

ONDAS DE ESTEIRA NO INTERIOR DE UM PORTO

SANDRO MIGUEL FERREIRA CARVALHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Doutor Paulo Avilez-Valente

FEVEREIRO DE 2018

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2017/2018

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446



miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2017/2018 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2018.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Este trabalho de investigação foi desenvolvido no âmbito da linha de investigação ECOSERVICES integrada no Projeto Estruturado de I&D&I INNOVMAR—Innovation and Sustainability in the Management and Exploitation of Marine Resources (referência NORTE-01-0145-FEDER-000035), cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE 2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

À minha família

AGRADECIMENTOS

No colmatar desta minha grande etapa académica e pessoal, e porque esta caminhada não se faz sozinho, quero deixar o meu agradecimento:

Aos meus pais, por me servirem de exemplo e motivação, pela compreensão, conselhos e apoio incondicional, este trabalho também é deles.

À minha namorada, pela paciência e suporte nos momentos mais difíceis, pela companhia em tardes e noites de trabalho, por todo o incentivo e compreensão, um obrigado muito especial.

Ao meu irmão, meu amigo de sempre.

Ao professor Paulo Avilez-Valente, pelos ensinamentos, orientação, disponibilidade e troca de conhecimento.

Aos meus amigos João, Zé e Diogo pelas conversas, noites de estudo, almoços, cafés, saídas e jantares, e por estarem sempre disponíveis quando era realmente preciso.

E também à D. Esmeralda pela amabilidade e disponibilidade oferecida.

A todos, um muito obrigado.

RESUMO

Ondas geradas por embarcações, ou ondas de esteira, são de significativo interesse quando se pretende dimensionar ou, numa fase já pós-construção, analisar os fenómenos que ocorrem e como se propagam as mesmas num ambiente portuário. A avaliação deste tipo de problemas é feita normalmente recorrendo a modelações físicas ou por observação no terreno, no entanto as primeiras encontram dificuldades na medida em que, por exemplo, não é muitas vezes possível manter a semelhança de Reynolds e de Froude simultaneamente, enquanto as segundas não fornecem dados que permitam prever comportamentos e são pouco precisas. Posto isto, é então de interesse abordar esta temática utilizando como ferramenta a modelação numérica, neste caso recorrendo ao modelo numérico SWASH.

Neste trabalho foi primeiramente abordado o processo de formação de ondas provocadas pelo movimento de embarcações, tentando perceber que parâmetros influenciam as suas características, como a sua altura e o seu ângulo de propagação. Para isso foram feitas validações que comparam resultados numéricos com valores analíticos bem conhecidos e que são normalmente utilizados na validação de outros modelos.

Posteriormente, foi realizado um estudo onde o objetivo principal é perceber o funcionamento dos sistemas embarcação-ondas e ondas-estruturas, através da modelação dessas embarcações, que geram as referidas ondas, que depois interagem com a estrutura da marina e com outras partes do porto adjacentes. Em conjunto com este estudo, procurou-se sempre, em jeito de comentário, fazer uma pré-análise ao que ocorre realmente, que problemas daí podem surgir e como podem ser evitados, abrindo caminho para trabalhos futuros com o objetivo de procurar as soluções mitigadoras dos efeitos das ondas de esteira.

As embarcações modeladas foram um cargueiro, um rebocador e uma lancha de pilotos, cada um deles em mais que um modelo de estudo, de forma a englobar uma abrangente gama de valores no que toca a dimensões e velocidades usuais de navegação no interior do porto, permitindo perceber quais as variáveis de maior importância no processo de formação das ondas e que tipo de embarcação se deverá ter mais em conta quando se pretende identificar a origem de problemas como ondulação excessiva no interior de locais portuários.

PALAVRAS-CHAVE: modelação numérica, SWASH, ondas de esteira, porto, embarcações

ABSTRACT

Ship-borne waves, or wake waves, are of significant interest when we want to project or, in a post construction phase, analyse the phenomena that occurs inside an harbour environment and how those waves propagate in it. Such analysis is often made using physical modelling or in situ observations, however, in the first one is usually impossible to both verify Froude's and Reynold's similarity, while the second ones do not deliver the data needed for forecasting behaviour and aren't very precise. Given that, it is indeed of interest to approach such matter using a numerical tool, which in this case was made running the numerical model SWASH.

In this work it was first studied the ship-borne waves formation process, trying to understand which parameters influence their characteristics such as height and wake angle relatively to the displacement trajectory. For that, validation which compares the numerical results with well known analytical values, often used in other model's validations, was taken.

Afterwards, a study was made in which the main goal was to understand the behaviour of the systems vessel-waves and waves-structures through the modelling of those vessels, that generate the said waves which will then interact with the said structures and other adjacent harbour sections. Along with this, it was given a commentary, a pre-analysis of what happens in the real world, which problems can come from each case and how they can be avoided, opening the path for future works whit the objective of finding solutions for the effect of ship-borne waves.

The vessels used in the dissertation were a cargo ship, a tug boat and a pilots boat, each one of them with more than a case study so that it includes a wide spectrum of values in respect to dimensions and usual cruising speeds inside an harbour, allowing us to understand which are the most important variables that come into play in the wake waves formation process and which type of vessel should be taken into account when it's needed to identify the source of problems, like excessive curling inside harbour environments.

KEY WORDS: numerical modelling, SWASH, wake waves, harbour, vessels

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
 1. INTRODUÇÃO	 1
1.1. PREFÁCIO	1
1.2. ÂMBITOS E OBJETIVOS	1
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2
 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	 3
2.1. CARACTERIZAÇÃO DO PORTO DE LEIXÕES E DA BATIMETRIA	3
2.2. GERAÇÃO DE ONDAS	4
2.3. ENQUADRAMENTO NACIONAL	11
2.4. O CONTEXTO INTERNACIONAL	12
 3. MODELO HIDRODINÂMICO - SWASH	 13
3.1. ESTRUTURA E EQUAÇÕES GOVERNANTES	14
3.2. INTEGRAÇÃO DO MATLAB COM O SWASH	15
3.3. INPUT E OUTPUT	16
3.4. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS	23
 4. O NOSSO MODELO	 25
4.1. MOTIVAÇÃO PARA O NOSSO CASO DE ESTUDO	25
4.2. CONDIÇÕES FÍSICAS DO LOCAL	25
4.3. VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	28
 5. RESULTADOS	 43
5.1. EMBARCAÇÃO TIPO CARGUEIRO	44
5.2. EMBARCAÇÃO TIPO REBOCADOR	51
5.3. EMBARCAÇÃO TIPO LANCHAS DE PILOTOS	68

6. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	81
1.1. CONCLUSÕES	81
1.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	82
7. Anexos	83
7.1. VISTAS DO CARGUEIRO USADO NA MODELAÇÃO	87
7.2. VISTAS DO REBOCADOR USADO NA MODELAÇÃO	88
7.3. VISTAS DA LANCHAS DE PILOTOS USADA NA MODELAÇÃO	89
Bibliografia	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do porto de Leixões (fonte www.APDL.pt).	3
Figura 2: Vista aérea do anteporto, marina e entrada do canal de navegação de Leixões (fonte: Google Earth).	4
Figura 3: Processo de formação de ondas de vento (© 2002 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc.).	5
Figura 4: Ondas provocadas pelo deslocamento de um barco a alta velocidade (foto de Edmont, Wikipédia, licença Creative Commons).	6
Figura 5: Ondas provocadas pelo deslocamento de um pato (foto de Daderot, Wikipédia, licença Creative Commons).	6
Figura 6: Sistema das ondas geradas por embarcações (adaptado de De Roo et al., 2010).	7
Figura 7: Definição das dimensões da embarcação (adaptado de Althaje, 2010).	10
Figura 8: Código MATLAB® de geração de campo de pressões.	16
Figura 9: Eixos coordenados do SWASH (adaptado de The SWASH Team, 2017).	17
Figura 10: Exemplo de processamento de dados.	19
Figura 11: Pedido de ficheiros de saída no SWASH.	20
Figura 12: Elevação da superfície livre para $t = 24$ s.	20
Figura 13: Elevação da superfície livre para $t = 32$ s.	21
Figura 14: Pedido de ficheiros de saída no SWASH.	21
Figura 15: Visualização 2DH das ondas de esteira no instante $t = 40$ s, obtida por pós-processamento.	22
Figura 16: Visualização 3D das ondas de esteira, obtida por pós-processamento.	22
Figura 17: Representação batimétrica da zona de cálculo. A zona mais escura é a mais profunda. ...	23
Figura 18: Imagem aérea da marina (fonte: Google Earth).	26
Figura 19: Batimetria da zona de estudo, Sistema de Coordenadas Militar Hayford-Gauss, Datum Lisboa e profundidade referida ao nível médio do mar.	27
Figura 20: Batimetria da zona de estudo, sistema de coordenadas local (em metros). Profundidade referida ao nível médio do mar.	27
Figura 21: Representação do campo de pressões $p(x, y, t)$	29
Figura 22: Obtenção de θK , da interseção entre as ondas transversais e divergentes. Ondas divergentes (1), ondas transversais (2) (adaptado de Soomere, 2007).	30
Figura 23: Identificação das zonas de interceção de ondas (adaptado de Soomere, 2007).	30
Figura 24: Ondas de esteira para $Fr = 0.63$	32
Figura 25: Ondas de esteira para $Fr = 1.30$	33
Figura 26: Ângulos θK e θFr (adaptado de David et al, 2017).	34

Figura 27: Ângulo de esteira, α , em função do número de Froude, Fr_h	34
Figura 28: Ângulo de esteira para $Fr = 0.63$	35
Figura 29: Ângulo de esteira para $Fr = 0.75$	35
Figura 30: Ângulo de esteira para $Fr = 1.05$	36
Figura 31: Ângulo de esteira para $Fr = 1.70$	36
Figura 32: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 0$ m/s e $t = 50$ s.	40
Figura 33: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 0$ m/s e $t = 100$ s. ..	40
Figura 34: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 10$ m/s e $t = 50$ s. ..	41
Figura 35: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 10$ m/s e $t = 100$ s.	41
Figura 36: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 18$ m/s e $t = 50$ s. ..	42
Figura 37: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 18$ m/s e $t = 100$ s.	42
Figura 38: Cargueiro Atlantis Alhambra (© Udo Mitzlaff, MarineTraffic.com).	44
Figura 39: Sentido e direção do cargueiro.	45
Figura 40: Posição e ondas geradas pelo cargueiro em $t = 20$ s.....	46
Figura 41: Posição e ondas geradas pelo cargueiro em $t = 60$ s.....	46
Figura 42: Posição e ondas geradas pelo cargueiro em $t = 160$ s.....	47
Figura 43: Posição e ondas geradas pelo cargueiro em $t = 300$ s.....	47
Figura 44: Linha a vermelho a secção de entrada da marina.....	48
Figura 45: Elevação da superfície livre à entrada da marina para $t = 191.2$ s.....	48
Figura 46: Envolventes da elevação da superfície livre à entrada da marina.....	49
Figura 47: Altura de onda máxima à entrada da marina.....	49
Figura 48: Visualização 3D das ondas geradas pela passagem do cargueiro em $t = 120$ s.	50
Figura 49: Visualização 3D das ondas geradas pela passagem do cargueiro em $t = 200$ s.	50
Figura 50: Rebocador Pella 16609 (© "PELLA" 2004–2018).....	51
Figura 51: Percurso retilíneo do rebocador.....	53
Figura 52: Percurso curvo do rebocador.	53
Figura 53: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 40$ s.	54
Figura 54: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 60$ s.....	54
Figura 55: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 100$ s.	55
Figura 56: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 153$ s.	55
Figura 57: Elevação da superfície livre sobre a trajetória do rebocador em $t = 100$ s.....	56
Figura 58: Secções à entrada da marina (—) e no interior da marina (— —).....	56
Figura 59: Altura máxima das ondas provocadas pelo rebocador na secção de entrada da marina. ..	57

Figura 60: Altura máxima das ondas provocadas pelo rebocador na secção no interior da marina....	57
Figura 61: Ondas de esteira geradas pelo rebocador para $t = 60$ s.	58
Figura 62: Ondas de esteira geradas pelo rebocador para $t = 130$ s.	58
Figura 63: Ondas de esteira geradas pelo rebocador para $t = 153$ s.	58
Figura 64: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 80$ s.	60
Figura 65: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 100$ s.	60
Figura 66: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 120$ s.	61
Figura 67: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 150$ s.	61
Figura 68: Altura máxima das ondas provocadas pelo rebocador à entrada da marina.	62
Figura 69: Altura máxima das ondas provocadas pelo rebocador numa secção no interior da marina.	62
Figura 70: Posição do rebocador e ondulação em $t = 40$ s.	64
Figura 71: Posição do rebocador e ondulação em $t = 75$ s.	64
Figura 72: Posição do rebocador e ondulação em $t = 95$ s.	65
Figura 73: Posição do rebocador e ondulação em $t = 120$ s.	65
Figura 74: Transeptos para análise da altura de onda máxima.....	66
Figura 75: Altura máxima das ondulação ao longo do transepto de cor preta (—).	66
Figura 76: Altura máxima da ondulação à entrada da marina, ao longo do transepto cor laranja (—).	67
Figura 77: Altura máxima da ondulação no interior da marina, ao longo do transepto de cor amarela (—).	67
Figura 78: Altura máxima da ondulação ao longo do transepto de cor vermelha (—).	68
Figura 79: Embarcação 17M Pilot Boat, embarcação tipo lancha de pilotos (© Besiktas Workboats).	68
Figura 80: Domínio de cálculo e trajetória da lancha de pilotos.	69
Figura 81: Agitação provocada pela lancha para $u = 5$ kn em $t = 60$ s.....	70
Figura 82: Agitação provocada pela lancha para $u = 5$ kn em $t = 179$ s.....	71
Figura 83: Altura de onda máxima provocada pela lancha na secção de entrada da marina para $u = 5$ kn.....	71
Figura 84: Visualização 3D para $t = 200$ s (escala vertical ampliada com um fator 2).....	72
Figura 85: Agitação provocada pela lancha para $u = 10$ kn em $t = 60$ s.....	73
Figura 86: Agitação provocada pela lancha para $u = 10$ kn em $t = 120$ s.....	73
Figura 87: Agitação provocada pela lancha para $u = 10$ kn em $t = 180$ s.....	74
Figura 88: Altura de onda máxima pela lancha à entrada da marina para $u = 10$ kn.	74
Figura 89: Transepto no interior da marina, para registo da agitação.....	75
Figura 90: Elevação da superfície livre, provocada pela passagem da lancha, em $t = 132$ s.....	75
Figura 91: Visualização 3D para $t = 120$ s (escala vertical ampliada por um fator 2).	76

Figura 92: Visualização 3D para $t = 150$ s (escala vertical ampliada por um fator 2).....	76
Figura 93: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 45$ s.	77
Figura 94: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 60$ s.	77
Figura 95: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 84$ s.	78
Figura 96: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 94$ s.	78
Figura 97: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 114$ s.	78
Figura 98: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 144$ s.	78
Figura 99: Agitação no interior da marina para $u = 15$ kn em $t = 84$ s.	79
Figura 100: Altura de onda máxima no interior da marina para $u = 15$ kn.	79
Figura 101: Visualização 3D para $t = 150$ s (escala vertical multiplicada por um fator 2).	80
Figura 102: Corte horizontal pela linha de água. Vista de cima.....	85
Figura 103: Corte vertical a meia-água (cargueiro e lancha de pilotos). Vista de estibordo.	85
Figura 104: Corte vertical a meia-água (rebocador). Vista de estibordo.	86
Figura 105: Corte verticais transversais. Vista de proa e vista de popa.	86
Figura 106: Vista do casco da embarcação.	87
Figura 107: Vista da popa e da proa da embarcação.	87
Figura 108: Vista da lateral da embarcação.....	87
Figura 109: Vista do casco da embarcação.	88
Figura 110: Vista da popa e da proa da embarcação.	88
Figura 111: Vista da lateral da embarcação.....	88
Figura 112: Vista do casco da embarcação.	89
Figura 113: Vista da popa e da proa da embarcação.	89
Figura 114: Vista da lateral da embarcação.....	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das metodologias para estimação da altura de onda provocada por embarcações.	11
Tabela 2: Ângulos de esteira, α . Soluções analítica e numéricas, em função do número de Froude, Fr.	37
Tabela 3: Coeficientes definidores dos cascos, adotados nesta dissertação.	85

1

INTRODUÇÃO

1.1. PREFÁCIO

Desde os inícios das primeiras civilizações que há uma notória ligação entre o Homem e os cursos de água. A água é indubitavelmente necessária à vida, e para além do seu consumo direto, é normalmente sinónimo de alimento, pelo que naturalmente as maiores e mais antigas civilizações se foram instalando nos cursos dos rios e junto ao mar. Como tal, obras marítimas e fluviais são das primeiras grandes obras civis a surgirem com o crescimento da humanidade, nomeadamente estruturas que permitam uma melhor utilização e beneficiação do meio onde estão inseridas. A busca contínua por conhecimento e progresso presente na natureza humana, aliada a um crescimento e aglomeração da população fizeram e fazem com que constantemente se procure melhorar a tecnologia e instalações usadas por todos nós.

Os portos, cada vez mais solicitados, tanto para trocas comerciais, deslocamento de pessoas e lazer, são exemplo disso mesmo, tendo recebido e continuando a receber um desenvolvimento constante ao longo dos anos. Ora para o desenvolvimento destas instalações é necessário ter um profundo conhecimento das variáveis que o afetam, sendo as mais importantes a ondulação e a profundidade dos canais. Este trabalho é focado na primeira, sendo que a ondulação tem vários tipos e origens, como a ondulação provocada por fenómenos atmosféricos, fenómenos astronómicos, movimentação e deslocamento de terras e ainda pelo deslocamento de corpos na massa de água, é este último caso que se pretende analisar neste trabalho; que efeito estas ondas, denominadas ondas de esteira, podem ter no interior dos portos e como se pode descrever este fenómeno, procurando assim perceber-lo para que se possa encontrar medidas mitigadoras dos seus efeitos prejudiciais.

Este tipo de trabalhos não tem muita expressão em Portugal, no entanto há já algum estudo mundial realizado, maioritariamente feito recorrendo às equações de Boussinesq (1872) e que se reverá no capítulo 2 desta tese quando forem revisitados esses estudos de forma a perceber o que já foi feito e em que poderá ser útil este trabalho, assim como encontrar pontos de referência para possíveis e necessárias comparações para avaliação de resultados.

1.2. ÂMBITO E OBJETIVOS

O caso prático estudado nesta dissertação localiza-se no interior porto de Leixões, nome que faz jus à zona onde antes existia como que um porto natural formado por um conjunto de colunas de rocha moldadas pelo vento e água, situado a norte da costa portuguesa onde desagua o rio Leça, que também contribui favoravelmente para esse porto natural para onde desliza calmamente e oferece uma distância de navegabilidade considerável para montante. Apesar destas boas características naturais, verificou-se

que em alguns casos para algumas embarcações aportadas no terminal, haveria uma ondulação excessiva para dias de ondulação fraca, e que não poderia ser provocada pelas ondas geradas pelo vento. Torna-se por isso necessário estudar qual o efeito que as ondas provocadas pelas embarcações de variados tamanhos que passam em direção ao canal de navegação do porto a velocidades relativamente elevadas têm no interior do mesmo, mais especificamente na marina de embarcações de recreio que aí perto se encontra, analisando assim não só o processo de formação das ondas como os efeitos de difração, refração e reflexão provocados por barreiras físicas, vento e características batimétricas.

Será então feita uma simulação da geração e propagação de ondas no interior do porto e analisar-se-á o que acontece quando estas encontram barreiras físicas sofrendo efeitos de refração, reflexão e difração, assim como se apresentará ideias para algumas possíveis soluções mitigadoras dos efeitos dessas ondas. Para isso será utilização o software de modelação numérica com um modelo hidrodinâmico não-linear e dispersivo SWASH.

Para efeitos de cálculo, a representação de diferentes tipos de embarcação que irão variar em tamanho e velocidade será através de um campo de pressões descrito por equações matemáticas em código MATLAB. Esse campo de pressões será ainda calculado em cada instante de tempo espaçado de um valor arbitrado de forma a obter todas as suas posições no intervalo de tempo pretendido. Ainda através do MATLAB serão criados ficheiros representativos das condições batimétricas e de barreiras físicas.

Após o código SWASH ser corrido com as condições definidas anteriormente, o recurso ao MATLAB é mais uma vez necessário para processar os ficheiros de saída e representar graficamente os resultados obtidos.

Esses resultados serão avaliados comparativamente com resultados de outros trabalhos realizados neste âmbito e ainda com valores resultantes de expressões analíticas, que serão abordadas com maior detalhe mais à frente.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

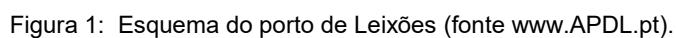
Este trabalho surge em continuação do trabalho que foi já feito pelo professor Dr. Paulo Avilez a pedido da APDL e tem como principal motivação o estudo mais aprofundado do software SWASH para uso de caso idênticos, procurando-se assim uma melhoria de conhecimento de uma ferramenta que oferece algumas vantagens na análise destes problemas, mas que pode ainda ser usado em quaisquer outros em que seja necessário perceber a interação das ondas com o meio.

Ao longo da dissertação foram consultados vários artigos científicos que abordam a mesma temática para se perceber como é que os problemas foram atacados por diferentes autores, podendo assim analisar cada método e selecionar aquele que parecer mais adequado ao caso, servindo também esses outros trabalhos como validação ao que foi sendo feito.

A dissertação está organizada por 7 capítulos, começando por este; a seguir faz-se uma análise do que foi referido no parágrafo anterior, isto é, uma análise bibliográfica. No capítulo 3 analisa-se e explica-se o *software* de cálculo numérico que está por trás de todos os resultados, o SWASH, e no capítulo 4 são apresentados os modelos que foram utilizados neste trabalho e com os quais se obtiveram e compararam os resultados que são apresentados no capítulo seguinte (5). O último capítulo pega nestes resultados e, baseia-se neles para tecer conclusões sobre o que está a acontecer e o que poderia acontecer noutros casos práticos e que condicionantes seriam necessárias alterar, assim como indica outras abordagens e temáticas que também teriam interesse em ser realizadas em futuros trabalhos. No último encontram-se os anexos.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O porto de Leixões é fruto de um desenvolvimento contínuo desde os finais do século XIX de uma zona costeira com boas características naturais para abrigo de embarcações e estruturas. É regularmente expandido para fazer face aos avanços tecnológicos e aumento da procura, contribuindo em larga escala para o crescimento e sustentabilidade económica da região e do país. Com 5 km de cais e centenas de hectares de área molhada, é o segundo maior porto artificial do país. Além dos seus extensos cais, possui ainda terminais de cruzeiros, contentores, Ro-Ro, multiusos, cruzeiros, porto de pesca e uma marina de recreio. Uma visão da distribuição destes espaços no interior do porto, pode ser apreciada na Figura 1.



A zona deste trabalho corresponde à zona área sombreada Figura 1, correspondente à área envolvente da marina de recreio. Na fotografia da Figura 2, é identificada a marina de recreio, para a qual se pretende estudar o efeito das ondas de esteira.

Na entrada do porto, junto ao posto A (ver Figura 1), a profundidade é de -15 m ZH^1 , sendo a zona mais profunda do porto. Estes valores de profundidade são importantes na medida de que a avaliação de determinados parâmetros físicos depende disso mesmo, assim como a abordagem que se tem a determinadas expressões matemáticas, variado caso estejamos numa situação de águas profundas ou de águas pouco profundas. O nosso maior interesse, isto é, a situação normalmente mais gravosa, ocorre para zonas pouco profundas, onde o fenómeno de rebentação é mais provável de ocorrer e onde o número de Froude, Fr , é mais elevado para a mesma velocidade de propagação. Essas zonas menos profundas encontram-se no interior do porto e são o porto de pesca e a marina de recreio, onde os fundos estão às cotas são de -4 m ZH e de -2.5 m ZH , respetivamente (cf. Figura 1).

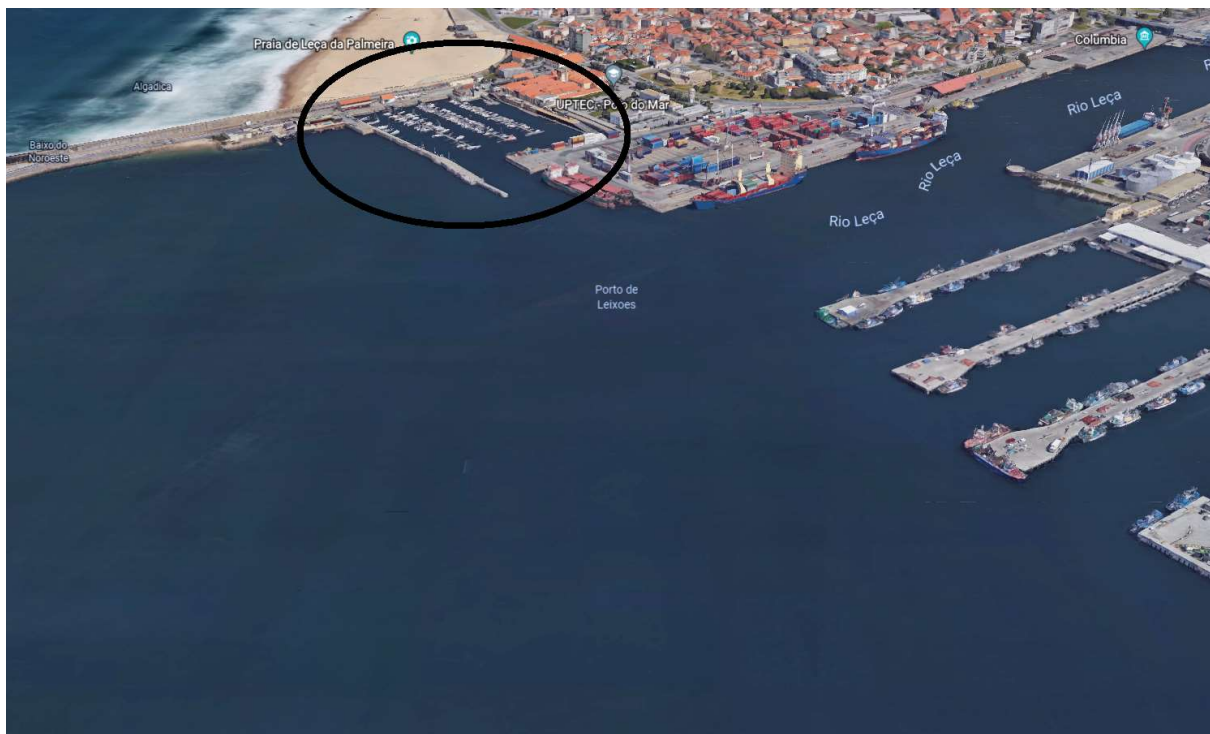


Figura 2: Vista aérea do anteporto, marina e entrada do canal de navegação de Leixões (fonte: Google Earth).

2.2. GERAÇÃO DE ONDAS

Qualquer onda tem o mesmo princípio físico no seu processo de formação, quando há interação entre dois corpos, há também transferência de energia entre eles. Como se sabe, as ondas de maré, ondas de largo período, são formadas pela interação que o campo gravítico da Lua e do Sol têm com as massas de água dos oceanos, onde o elemento principal nesta formação é a energia potencial que advém da força gravítica. Outro tipo de ondas são as ondas de *swell*, as mais comuns e que se observam no mar quando se visita uma praia, por exemplo. Este tipo de ondas é gerado em alto mar, e são devidas à

¹ Zero Hidrográfico (2 m abaixo do nível médio do mar).

interação entre a atmosfera e o mar. Quando dois fluidos estão em contacto ao longo de uma superfície, o fluido que se desloca com maior velocidade transfere parte da sua energia, através do atrito, para o fluido que se desloca a menor velocidade. Neste caso, o vento soprando, continuamente numa mesma direção, começa por criar ondas capilares que têm tendência a dissipar-se devido à tensão superficial da água, mas, se a duração do vento e o *fetch* (comprimento da área sobre a qual o vento atua) forem suficientemente longos, as começam a ganhar altura, tornando a superfície do mar mais rugoso, havendo por isso uma maior transferência de energia do vento para a ondulação. Nestas condições, a tensão superficial deixa de ser suficiente para provocar a sua dissipação e as forças gravíticas induzem a propagação destas ondas na direção do vento. Nestas condições, as ondas designam-se por ondas de gravidade, propagando-se praticamente sem dissipação de energia até às zonas costeiras.

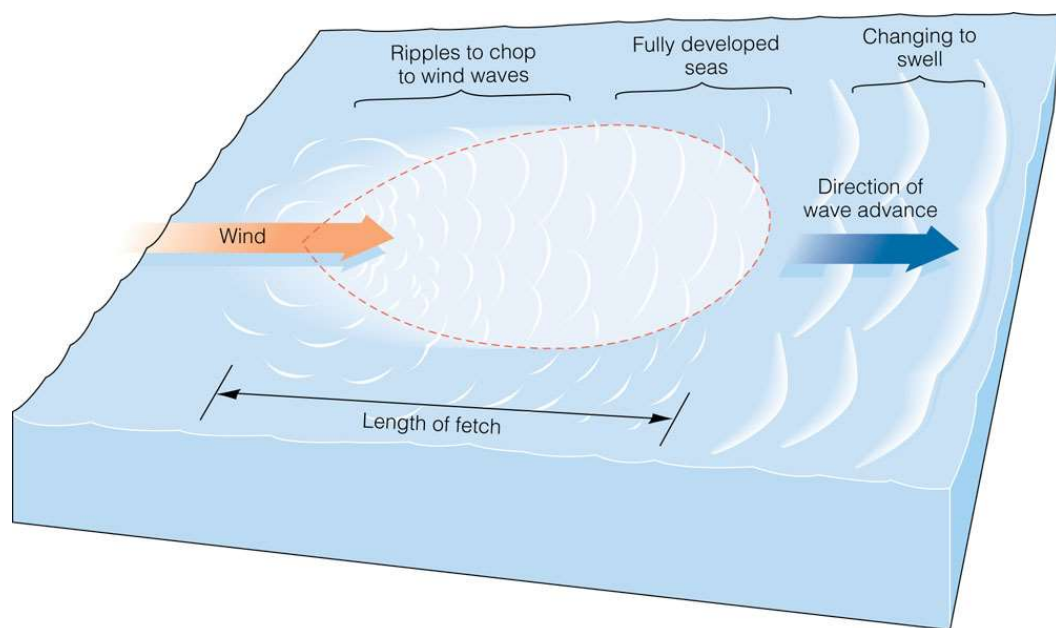


Figura 3: Processo de formação de ondas de vento (© 2002 Brooks/Cole, a division of Thomson Learning, Inc.).

Já as ondas de esteira (cf. Figuras 4 e 5), objeto deste trabalho, têm um mecanismo de formação bastante diferente, com um princípio de transferência de energia bem patente. Estas ondas são geradas devido ao deslocamento de água provocado pelo movimento de um corpo nessa mesma massa de água, obrigando a que esta se desloque para os lados. Este movimento contínuo, ao longo da trajetória do corpo, faz com que esses deslocamentos laterais se sobreponham gerando uma onda gravítica contínua que se propaga, afastando-se do corpo que a provocou. A forma destas ondas dependendo da velocidade a que a embarcação (ver Figura 4), ou outro qualquer corpo (cf. Figura 5), se desloca e da profundidade local. Como com todo o tipo de ondas, e não só as ondas gravíticas na água, estas ondas estão sujeitas ao efeito de Doppler, criando algumas singularidades quando a velocidade da embarcação é superior à da propagação do grupo de ondas, podendo existir alguma rebentação e alteração da forma das ondas posterior à passagem do barco (cf. Figura 4).



Figura 4: Ondas provocadas pelo deslocamento de um barco a alta velocidade (foto de Edmont, Wikipedia, licença Creative Commons).



Figura 5: Ondas provocadas pelo deslocamento de um pato (foto de Daderot, Wikipedia, licença Creative Commons).

A descrição da geração e propagação deste tipo de ondas é um pouco mais complexa do que as das ondas geradas pelo vento, nomeadamente por serem formadas por dois sistemas distintos, um sistema de ondas primárias e um sistema de ondas secundárias (ver Figura 6).

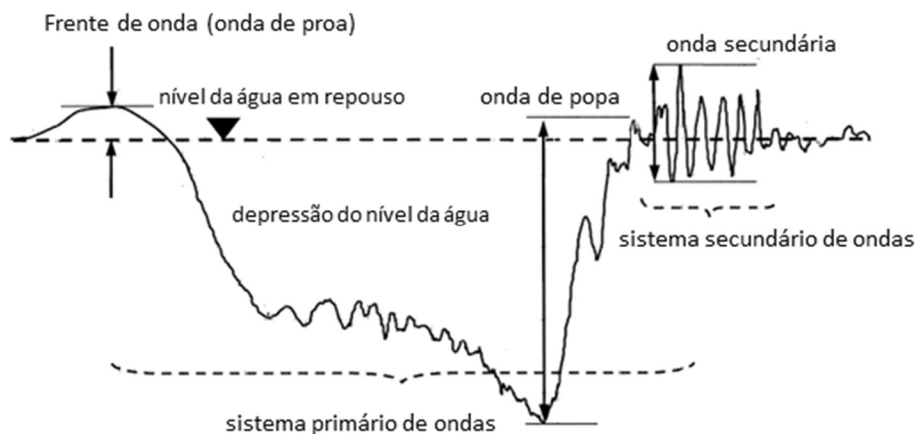


Figura 6: Sistema das ondas geradas por embarcações (adaptado de De Roo et al., 2010).

2.2.1. ESTIMAÇÃO DE ALTURA DE ONDA MÁXIMA

Por existirem tantos fatores que influenciam a altura de onda provocada por uma embarcação, é muito difícil conseguir uma estimativa fiável através de uma equação generalizada. Vários estudos foram feitos com esse objetivo. No entanto, os mais generalistas, isto é, os que apresentam expressões que pretendem ser válidas para qualquer tipo de embarcação, velocidade e condições de fundos, têm uma margem de erro significativamente elevada, enquanto os que apresentam expressões mais precisas são mais limitados na sua aplicação.

A magnitude que estas variações no nível da água podem ter, e que depende de vários fatores, entre eles o volume de água deslocado, a profundidade a que estão os fundos, a velocidade a que se desloca a embarcação e a forma do casco da embarcação, pode ser estimada sem diferenciar os sistemas primário e secundário ondas.

São seguidamente apresentados alguns métodos que resultam de trabalhos feitos na área ao longo dos anos, e que fornecem todos eles uma expressão para a magnitude das ondas de esteira obtida empiricamente. É importante salientar que algumas destas metodologias necessitam do cálculo do número de Froude, sendo que a formulação deste parâmetro adimensional difere conforme o movimento da embarcação ocorre em águas profundas ou pouco profundas. O critério que caracteriza estas duas condições depende da relação entre a profundidade local, l , e o comprimento das ondas de esteira, λ , por ela geradas. Caso o comprimento de onda seja inferior a duas vezes a profundidade dos fundos onde a embarcação se encontra, consideram-se águas profundas, caso contrário, se o comprimento de onda for superior ao dobro da profundidade, considera-se que a embarcação está em águas pouco profundas.

Portanto, no caso de $\lambda/h < 2$, aplica-se o critério de águas profundas, e o número de Froude é baseado no comprimento da embarcação. L , como comprimento característico:

$$Fr_L = \frac{u}{\sqrt{gL}} \quad (1)$$

onde u é a velocidade da embarcação e g é a aceleração da gravidade. Por outro lado, quando $\lambda/h > 2$, considera-se uma situação de águas pouco profundas e o número de Froude utiliza a profundidade como comprimento característico:

$$Fr_h = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (2)$$

2.2.11. Metodologia de Sorensen e Weggel

Sorensen e Weggel (1984) estimam a altura, H , das ondas de esteira produzidas por uma embarcação em águas pouco profundas, como sendo

$$H = H^* \cdot \nabla^{1/3} \quad (3)$$

onde H^* é um parâmetro adimensional, e ∇ é o volume de água deslocado pela embarcação, A expressão (3) será apenas válida para um número de Froude tal que $0.2 < Fr_h < 0.8$.

O parâmetro adimensional H^* é calculado como

$$H^* = \alpha \cdot y^{*n} \quad (4)$$

onde

$$y^* = \frac{y}{\nabla^{1/3}} \quad (5)$$

sendo y a distância entre o ponto onde é feita a estimacão e a linha da trajectória da embarcação, com o expoente n dado por

$$n = \gamma \cdot (h^*)^\delta \quad (6)$$

Na expressão (6), h^* , uma profundidade adimensionalizada como

$$h^* = \frac{h}{\nabla^{1/3}} \quad (7)$$

O fator α , função do número de Froude e da profundidade adimensional h^* , é tal que

$$\log(\alpha) = a + b \log(h^*) + c \log^2(h^*) \quad (8)$$

com os coeficientes a , b e c definidos como

$$a = -\frac{0.6}{Fr_h} \quad (9)$$

$$b = 0.75 Fr_h^{-1.125} \quad (10)$$

e

$$c = 2.653 Fr_h - 1.95 \quad (11)$$

O parâmetro γ , também ele dependente do número de Froude, é dado por

$$\gamma = -0.225 Fr_h^{-0.699}, \quad \text{para} \quad 0.2 \leq Fr_h \leq 0.55 \quad (12)$$

ou por

$$\gamma = -0.342, \quad \text{para} \quad 0.55 \leq Fr_h \leq 0.8 \quad (13)$$

Finalmente, o expoente δ na expressão (6) define-se como

$$\delta = -0.118 Fr_h^{-0.356}, \quad \text{para} \quad 0.2 \leq Fr_h \leq 0.55 \quad (14)$$

ou

$$\delta = -0.146, \quad \text{para} \quad 0.55 \leq Fr_h \leq 0.8 \quad (15)$$

2.2.1.2. Metodologia de Kriebel e Seelig

O método de Kriebel e Seelig (2005), além de ser o mais recente abordado nesta dissertação, é o que tem uma limitação mais restrita no que diz respeito aos valores do número de Froude passíveis de serem utilizados, adicionando ainda um outro condicionalismo relacionado com a distância, definindo que os valores estimados são apenas para uma distância muito próxima do comprimento da embarcação, em relação à linha da trajetória, tendo que $0.3 \leq Fr_h \leq 0.8$ e $0.9 \leq y/L \leq 1.1$, a expressão generalizada para a altura de onda H é:

$$\frac{gH}{u^2} = \beta (Fr_* - 0.1)^2 \left(\frac{y}{L}\right)^{-1/3} \quad (16)$$

onde Fr_* é um número de Froude modificado, independente da profundidade relativa, e dado por

$$Fr_* = Fr_L \cdot e^{\alpha \frac{D}{h}} \quad (17)$$

sendo D o calado da embarcação, e α é um coeficiente adimensional que varia com a forma do casco e que é definido como:

$$\alpha = 2.5 (1 - C_B) \quad (18)$$

com C_B definido com a razão entre o volume de água deslocado, ∇ , e o volume de um paralelepípedo envolvente da embarcação, i.e.

$$C_B = \frac{\nabla}{L \cdot B \cdot D} \quad (19)$$

sendo B a largura máxima da embarcação. O outro coeficiente adimensional β em (16) é calculado como:

$$\beta = 1 + 8 \cdot \tanh^3 \left[0.45 \left(\frac{L}{L_E} - 2 \right) \right] \quad (20)$$

onde L_E , comprimento de entrada, é definido como a distância entre a proa e o ponto de máxima largura do barco (ver Figura 7).

O parâmetro y dependerá da distância a que se pretende estimar a onda gerada pelo movimento da embarcação. No caso de se pretender estimar a máxima altura que estas poderão atingir, as experiências descritas em Kriebel e Seelig (2005), demonstraram que a melhor correlação encontrada para máxima altura de onda e a razão y/L em (16) é precisamente para $y/L = 1$, pelo que após substituição na expressão (16), se pode concluir que:

$$H_{\text{máx}} = \frac{u^2}{g} \beta (Fr_* - 0.1)^2 \quad (21)$$

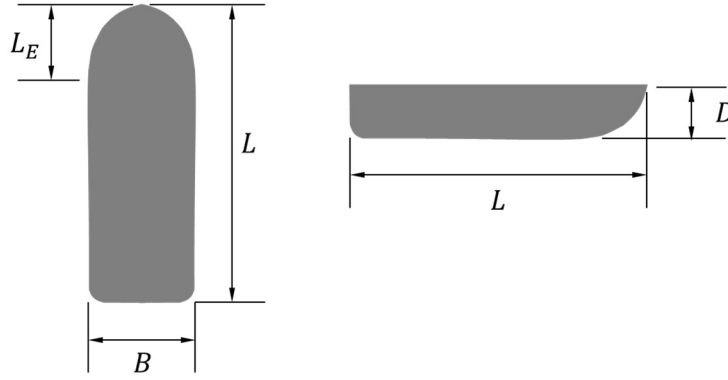


Figura 7: Definição das dimensões da embarcação (adaptado de Althaje, 2010).

Conclui-se assim que a altura máxima de ondas de esteira geradas por uma embarcação dependerá da velocidade de deslocamento da embarcação, da profundidade local e da forma da mesma.

2.2.1.3. Metodologia de Hochstein

O método de Hochstein (USACE, 1980), descrito em Bhowmik et al. (1982), tem a particularidade de não ter nenhuma condicionante à sua utilização e requerer poucos cálculos de parâmetros adimensionais e/ou empíricos. No entanto a sua precisão é relativamente baixa, devendo ser apenas usado quando há pouca informação relativamente à forma da embarcação. Além disso, é considerado neste método que a embarcação se desloca num canal de secção finita e não em mar aberto, pelo que pode ser aplicado a embarcações que se deslocam no interior de porto ou outras zonas delimitadas, como é o caso deste trabalho.

Neste método, a altura máxima pode então ser estimado como,

$$H_{\text{máx}} = 0.0448 u^2 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{B \cdot D}{A_c} \right)^{-2.5} \quad (22)$$

onde A_c representa a área da secção transversal do canal e L , B e D são as dimensões da embarcação, tal como anteriormente definidas (cf. Figura 7), a qual é suposta deslocar-se com a velocidade u .

Este é um método bastante simples e expedito, e por isso acarreta um maior risco de erro de estimação, pelo que a expressão (22) deve ser utilizada com o cuidado devido.

2.2.1.4. Metodologia de Bhowmik

À semelhança do método de Hochstein, o método de Bhowmik (Bhowmik et al., 1975) conduz também a uma expressão simples e de cálculo rápido. Foi desenvolvida para estimar a altura das ondas de esteira geradas por embarcações de pequeno porte, deslocando-se a velocidades elevadas. Desta forma, apenas deverá ser aplicada quando as embarcações se encontrarem em regime de deslizamento ou semi-deslizamento, sendo a altura de onda à distância y da trajetória dada por:

$$H = \left[0.139 \cdot u^{1.174} \left(\frac{y}{L} \right)^{-0.915} D^2 \right]^{1/2} \quad (23)$$

2.2.1.5 Tabela resumo

As metodologias para a estimação da altura de onda de esteira estão sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo das metodologias para estimação da altura de onda provocada por embarcações.

Metodologia	Expressão	Limitações
Sorensen e Weggel	$H = H^* \cdot \nabla^{1/3}$	$0.2 \leq Fr_h \leq 0.8$
Kriebel e Seelig	$H_{\text{máx}} = \frac{u^2}{g} \beta (Fr_* - 0.1)^2$	$0.9 \leq \frac{y}{L} \leq 1.1$ $0.3 \leq Fr_h \leq 0.8$
Hochstein	$H_{\text{máx}} = 0.0448 u^2 \left(\frac{D}{L} \right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \frac{B \cdot D}{A_c} \right)^{-2.5}$	Sem restrições
Bhowmik	$H = \left[0.139 u^{1.174} \left(\frac{y}{L} \right)^{-0.915} D^2 \right]^{1/2}$	Pequenas embarcações e velocidades elevadas

2.3. ENQUADRAMENTO NACIONAL

A nível nacional, a modelação numérica do efeito de ondas de esteira em zonas portuárias diz respeito é ainda pouco aplicada. Já num contexto mais geral, como é o caso de análise computacional de ondas (independentemente da fonte) há trabalhos de investigação académica, utilizando não só o SWASH, como outros modelos, maioritariamente baseados nas equações de Boussinesq (1872).

Araújo (2016) avaliou o desempenho do SWASH em fundos de variação rápida, analisando a viabilidade e eficácia que a implantação de um recife artificial teria numa praia no Estoril, utilizando ondas regulares. A autora compara os resultados obtidos numericamente com resultados obtidos em laboratório. O estudo revelou um bom ajuste e uma boa capacidade do SWASH para simular a propagação de ondas de superfície nas condições batimétricas referidas.

Já em Forte (2017), pode-se encontrar um estudo da aplicabilidade deste modelo numérico no cálculo de galgamentos, simulando a propagação das ondas e galgamento de uma estrutura e a respetiva área de inundação. São obtidos resultados para a altura de onda, caudal e volume de galgamento, que são posteriormente comparados com as medições realizadas num modelo físico. No entanto, por não terem sido analisadas as condições de reflexão nem considerada a porosidade das estruturas, os resultados obtidos no modelo numérico ficaram bastante distantes dos obtidos no modelo físico.

Antunes do Carmo (2011) aplicou um modelo de ondas 1DH do tipo Boussinesq para fazer experiências numéricas com ondas de esteira.

2.4. O CONTEXTO INTERNACIONAL

No panorama internacional, há diversos estudos realizados neste campo. No caso do efeito de ondas de esteira em portos e/ou marinas utilizando o modelo numérico SWASH, não foram encontrados trabalhos publicados, oferecendo por isso uma motivação extra para a realização deste trabalho. No entanto, há vários estudos envolvendo a simulação numérica de ondas de esteira geradas por navios, em que o modelo aplicado tem por base equações de Boussinesq.

Desde os finais do século XIX, por sinal coincidente com a construção do porto de Leixões, que cientistas e engenheiros têm interesse em encontrar formulações matemáticas que descrevam com suficiente precisão as ondas geradas por embarcações. Kelvin (1887) terá sido dos primeiros, se não mesmo o primeiro, a estudar as perturbações na água, provocadas pelo deslocamento de um barco, tendo conseguido identificar a existência de um ângulo formado por essas perturbações, e que variava para diferentes velocidades e profundidades. Mais tarde, Havelock (1908) apresentou a formulação matemática que permitiu descrever o ângulo que havia sido teorizado por Kelvin anos antes.

2.4.1. GERAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE ESTEIRA

De entre todos os trabalhos que foram revistos onde se analisa a geração e propagação de ondas geradas pelo movimento de embarcações, verificou-se nenhum utilizou o SWASH nesse trabalho. Considerando que uma embarcação representa, para efeitos de cálculo, o mesmo que uma perturbação no nível de água e nas pressões, procurou-se substituir as embarcações por um campo de pressões representativo. O que se faz é, através de superfícies matemáticas simples que se assemelhem o mais possível ao tipo de embarcação que se pretende estudar, cria-se um campo de pressões superficiais, que quando aplicado num modelo hidrodinâmico represente aproximadamente o campo de pressões produzido pela embarcação. Esse campo de pressões evolui no espaço com o tempo, simulando assim o deslocamento da embarcação sobre a superfície da água. Os estudos deste tipo são ainda em número reduzido. David et al. (2016) e Bayraktar Ersan e Beji (2012,2013) desenvolveram e calibraram modelos numérico baseados nas equações de Boussinesq para a modelação de ondas de esteira, sendo que David et al. (2016) aplicaram o seu modelo a um estudo de campo. Torsvik e Soomere (2008) introduziram termos de pressão superficial num modelo de elementos finitos baseado nas equações de Boussinesq, para simularem a geração de ondas de esteira por embarcações do tipo ferry-boat na baía de Tallin.

3

MODELO HIDRODINÂMICO — SWASH

SWASH, acrónimo de *Simulating WAves til SHore*, é um modelo numérico para a simulação da geração, propagação e transformação de ondas, com carácter não-linear e distribuição não-hidrostática de pressões, desde o largo até à costa. Pode ser usado para o estudo da variação rápida de correntes em águas pouco profundas (como tsunamis ou ondas de cheia), correntes devidas a variações de densidade, circulação de correntes oceânicas em grande escala, marés, propagação e agitação devida a ondas no interior de portos, e a interação da ondulação com estruturas costeiras. Os fenómenos físicos que a formulação adotada no SWASH implementa, incluem (The SWASH Team, 2017):

- empolamento da onda;
- movimento da linha de costa;
- dissipação por atrito no fundo;
- geração de ondas pelo vento;
- refração da onda;
- difração da onda;
- dispersão de frequência;
- interações onda-onda não lineares;
- dissipação por rebentação;
- espraçamento da onda;
- reflexão parcial e transmissão da onda
- interação onda-estrutura;
- interação onda-corrente;
- turbulência vertical;
- correntes induzidas pela agitação;
- amortecimento de ondas provocado por vegetação;
- correntes de variação rápida;
- ondas de maré;
- ondas de cheia;

- campo de velocidade do vento e da pressão atmosférica com variação temporal;
- transporte de sedimentos em suspensão.

Sendo um modelo bastante completo, que permite a simulação simultânea de um grande número de fenómenos, conduz a uma reprodução bastante precisa da agitação da agitação marítima tanto no campo da oceanografia como no campo da engenharia costeira e portuária.

O SWASH é um modelo de resolução de fase, o qual é normalmente o mais indicado para situações em que os efeitos de difração são importantes, como é o caso onde existem barreiras físicas verticais, tais como quebra-mares, portos, etc. É também um tipo de modelo cuja exigência computacional é bastante elevada, comparativamente à exigência computacional de um modelo que reproduza a propagação do espectro da energia de onda, como por exemplo o SWAN (Booij et al., 1996), tanto a nível de memória como de CPU.

O código deste modelo, escrito em FORTRAN, tem vindo a ser validado através de comparações com soluções analíticas e dados obtidos em ensaios laboratoriais e de campo, com uma abrangente gama de tipos de onda e condições topográficas (Zijlema et al., 2011), por forma a torná-lo o mais eficiente e robusto possível. O objetivo é possibilitar com um único modelo, o estudo de uma grande amplitude de escalas de tempo e espaço, podendo-se estudar dimensões desde a ordem dos centímetros até quilómetros, e em termos de escalas de tempo, de segundos a horas. Grande parte desta robustez computacional deve-se ao facto do SWASH poder ser corrido num modo em modo hidrostático, utilizando uma única camada vertical, ou num modo não-hidrostático em que o domínio vertical pode ser representado por uma única camada, ou ser dividido em várias camadas, permitindo que com esse aumento do número de camadas se melhore a representação dos fenómenos dispersivos, e se diminua a propagação do erro dispersivo, tendo como consequência um aumento das escalas de tempo e de espaço em que o código não diverge. Obviamente que o aumento do número de camadas verticais corresponde a um aumento das necessidades computacionais, pelo que se deve procurar obter um equilíbrio entre a precisão pretendida, os recursos de que se dispõe, a dimensão do domínio de cálculo, e o tempo disponível para o cálculo e obtenção de uma solução.

3.1. ESTRUTURA E EQUAÇÕES GOVERNATIVAS

A estrutura base do modelo e as equações governativas do SWASH têm por base um sistema de notação cartesiano, sobre um domínio a duas dimensões horizontais (2DH), o que não impede que o resultado que se obtém representa uma realidade tridimensional (3D), já que é possível obter a elevação da superfície livre e, no caso da modelação em modo não-hidrostático, reproduzir parte da estrutura vertical do escoamento. O modelo de uma camada, não hidrostático, pode ser descrito pelas equações não lineares de águas pouco profundas, associadas a uma equação de integração da pressão na vertical (Zijlema et al., 2011). As equações de águas pouco profundas obtêm-se por integração na vertical das equações de Navier-Stokes para escoamentos incompressíveis, resultando numa equação de conservação da massa:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (24)$$

e em duas equações de conservação da quantidade de movimento, segundo os eixos OX e OY :

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial x} dz + c_f \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h} \\ = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(h \tau_{xy})}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{h} \int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial y} dz + c_f \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h} \\ = \frac{1}{h} \left(\frac{\partial(h \tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h \tau_{yy})}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (26)$$

onde t representa o tempo, x e y as são coordenadas horizontais, z é o coordenada vertical, referida ao nível da água em repouso, η é a elevação da superfície livre, d é a profundidade local medida em relação ao nível da água em repouso, $h = d + \eta$ é a profundidade local total da água, u e v são as componentes da velocidade da corrente, calculada como a média na coluna de água das componentes horizontais do vetor velocidade, q é a pressão não hidrostática normalizada (i.e. $q = p/\rho$, onde p é a pressão e ρ é massa volúmica); g é a aceleração gravítica; c_f é o coeficiente adimensional do atrito no fundo e τ_{ij} são as componentes horizontais das tensões turbulentas.

O integral da pressão não-hidrostática nas equações em (25) pode ser descrita por (Stelling e Zijlema, 2003):

$$\int_{-d}^{\eta} \frac{\partial q}{\partial x} dz = \frac{1}{2} h \frac{\partial q_b}{\partial x} + \frac{1}{2} q_b \frac{\partial(\eta - d)}{\partial x} \quad (27)$$

com q_b a representar a pressão não-hidrostática no fundo. Uma equação semelhante pode ser deduzida para o integral em (26).

Para além destas, outras equações estão incluídas no modelo SWASH, nomeadamente equações do tipo constitutivo. Para uma análise mais aprofundada de todas as equações incluídas no modelo deverá ser consultada bibliografia adicional, por exemplo Zijlema et al. (2011).

3.2. INTEGRAÇÃO DO MATLAB® COM O SWASH

A utilização do SWASH requer que lhe sejam fornecidos ficheiros que representem a batimetria, o campo de velocidades do vento e, no caso específico das ondas de esteira, o campo de pressões induzido pela presença de uma embarcação. Isso pode ser feito disponibilizando ao SWASH ficheiros em formato texto, *ascii*. Para casos simples, por exemplo, sem vento a atuar e com um fundo completamente plano, este processo é trivial e facilmente realizado manualmente criando para isso dois ficheiros com um par de linhas de valores. No entanto, para aplicações mais complexas onde a batimetria é variável e onde o campo de pressões que varia com tempo, torna-se necessário o recurso a ferramentas computacionais que possam criar esses ficheiros fornecendo. Neste trabalho recorreu-se ao pacote informático MATLAB® para processamento dos campos de pressões.

Neste trabalho, pretende-se simular o movimento de uma embarcação através de um campo de pressões variável no tempo. Para tal são necessários ficheiros com o campo de pressões em vários instantes temporais. O número total de campos de pressões, N_{PR} depende do tempo de duração do movimento da

embarcação t_{mov} , e do intervalo de tempo de discretização, Δt_{mov} , necessário para uma correta representação da evolução do movimento, i.e. $N_{\text{PR}} = t_{\text{mov}}/\Delta t_{\text{mov}}$. O número de ficheiros criados para este efeito pode ser bastante elevado, por exemplo, para uma simulação de 2 min com um intervalo de tempo de 0.1 s, seriam necessários 1200 ficheiros. A precisão espacial da distribuição de pressões dependerá simultaneamente da precisão necessária para definir a dimensão e forma da embarcação e da precisão necessária para a definição do próprio campo de pressões. Na Figura 8, é apresentado um pequeno excerto de código escrito para MATLAB®, para obtenção de campos de pressão parabólicos. A definição dos campos de pressão e da sua evolução temporal, depende de vários parâmetros físicos, tais como as dimensões da embarcação, o seu peso e a sua velocidade.

```

for it = 0:nt
    kt = it+1;
    ti = tt(kt);
    xd = uu*ti;
    xu = xx-uu*(ti)-x0;
    axu = 1-xu.^2/LL^2;
    pp = 9/4 * po * axu .* ay2;
    pp(xu<-LL) = 0;
    pp(xu>LL) = 0;
    pp(yy<-RR) = 0;
    pp(yy>RR) = 0;
    % if mod(it,50) == 0,
    if mod(it,10) == 0,
        ti
        xamax = max(round(xd/25)*25+25,50)+50;
        xamin = xamax-50;
        axis([xamin xamax yamin yamax]);
        contour(xx,yy,pp);
        axis([xamin xamax yamin yamax]);
        axis equal;
        pause(0.0001);
    end
    knr = num2str(it,'%6.6i');
    flnam = strcat(['parabolical_pressure_',knr,'.txt']);
    save(flnam,'-ascii','pp');
    fprintf(fid,'%s\n',flnam);
end

```

Figura 8: Código MATLAB® de geração de campo de pressões.

O MATLAB® é ainda usado para processamento de resultados. De salientar que nem todos os ficheiros que o SWASH gera são lidos pelo MATLAB®, aliás, o MATLAB® não é especificamente necessário para ler nenhum *output*, no entanto, e como foi escolhido para o fazer, achou-se importante fazer uma referência a este pacote informático.

3.3. INPUT E OUTPUT

Neste subcapítulo abordar-se-á aquilo que é feito antes e depois do SWASH ser corrido, isto é, os *inputs* e os *outputs*, respetivamente. Não se vai fazer uma descrição exaustiva de todos os *inputs* e *outputs* que o SWASH pode requerer ou fornecer já que essa lista é ainda extensa e também não é o propósito desta

tese, sendo assim apenas serão referidos os *inputs* que forem utilizados no código do modelo, sendo a metodologia análoga para a avaliação dos *outputs*.

3.3.1. MALHAS E TEMPOS

3.3.1.1. Geral

O SWASH pode operar num sistema de coordenadas cartesianas ou num sistema de coordenadas esféricas. Este último sistema poderá ser o mais indicado quando se pretende estudar, por exemplo, marés ou ondas geradas por vento onde a escala espacial é bastante grande. No caso das ondas de esteira em porto, em que a escala espacial é na ordem das dezenas ou centenas de metros não há necessidade de utilização de sistemas esféricos, pelo que se utiliza um sistema de coordenadas cartesianas. Na Figura 9, está representado esquema utilizado pelo SWASH para definição da orientação das grelhas de cálculo, num sistema cartesiano.

O SWASH requer que sejam definidas pelo utilizador as malhas espaciais. É necessário definir a malha computacional, ou de cálculo, as malhas dos *inputs*, como as malhas que definem a batimetria, o campo de velocidades iniciais, os campos de velocidade do vento, os campos de pressão atmosférica, etc. e ainda as malhas em que o utilizador pretende que o SWASH apresente os resultados, i.e. os *outputs*.

Este processo pode ser simplificado pelo facto de que as componentes do vento, atrito no fundo, dimensão das partículas e vegetação não precisarem de ter a sua malha definida se os seus valores forem uniformes ao longo da área de interesse, como é o caso.

A definição das malhas e das condições de fronteira é feita num ficheiro dito de comandos, onde uma linha de comando corresponderá a uma definição específica.

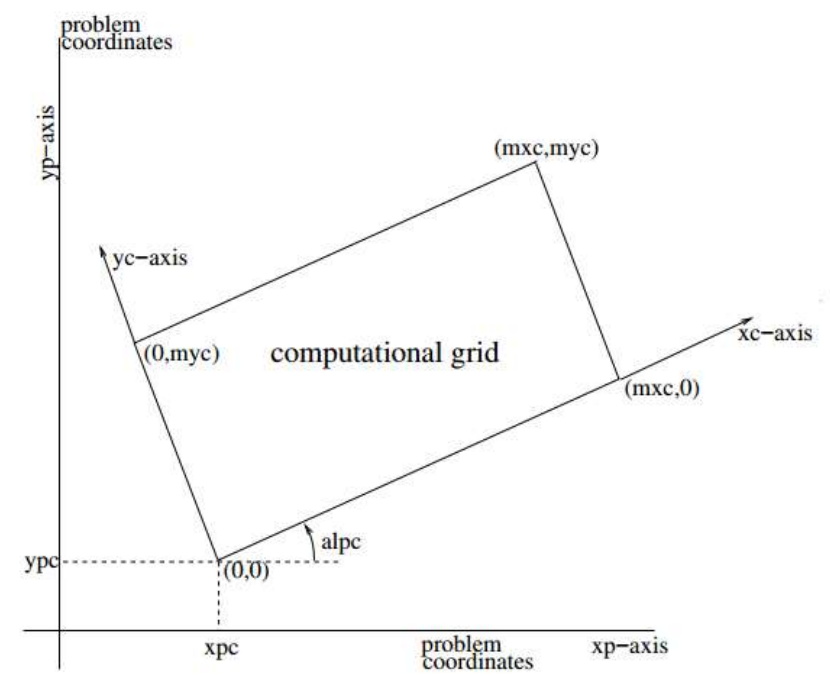


Figura 9: Eixos coordenados do SWASH (adaptado de The SWASH Team, 2017).

3.3.1.2. Malha de cálculo

A malha de cálculo é definida pelo utilizador e deverá corresponder a uma área geográfica menor do que as malhas de *inputs*, nomeadamente do que as malhas com a batimetria e campos de vento, para evitar que o SWASH tenha de proceder a extrapolações destes campos. A orientação da malha de cálculo pode ser escolhida arbitrariamente pelo utilizador. A resolução escolhida para esta malha, $\Delta x \times \Delta y$, deve ser tal que permita obter suficiente detalhe para o cálculo do campo de ondas, ou seja, deve ser tida alguma atenção nas características esperadas das ondas que irão surgir no decorrer do cálculo.

Para acompanhar o cálculo que vai ser feito nesta malha é necessário também ao utilizador definir a janela temporal na qual o SWASH deverá correr e aqui dependerá do próprio problema que se pretende estudar. Depois disso é ainda necessário instruir o SWASH sobre qual a discretização pretendida para a janela temporal, i.e o passo de tempo Δt entre dois cálculos sucessivos das variáveis do problema (elevação da superfície livre, velocidades, etc.). O passo de tempo deve ser tal que o número de Courant, Cr , definido como

$$Cr = \Delta t (\sqrt{gh} + \sqrt{u^2 + v^2}) \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2}} \quad (28)$$

tenha um valor compreendido entre 0.4 e 0.8, ou, para casos onde existem interações com estruturas como quebra-mares e paredes portuárias, inferior a 0.5. A verificação da conformidade do número de Courant, é realizada pelo próprio SWASH, prova da sua robustez, reduzindo para metade o passo de tempo Δt definido pelo utilizador, caso o valor de Cr ultrapasse os limites anteriormente referidos.

Devem ser definidas tantas malhas de entrada quanto os parâmetros específicos que o SWASH considera se querem utilizar (como a elevação inicial da superfície livre, o atrito no fundo, a batimetria, os ficheiros de pressões, etc.). A resolução escolhida para estas malhas deve ser tal que permita obter suficiente detalhe para o cálculo do campo de ondas, ou seja, deve ser tida alguma atenção nas características esperadas das ondas que irão surgir no decorrer do cálculo para bem definir a finura das malhas.

3.3.2. INPUT

Devem ser definidas tantas malhas de entrada de dados, quanto os parâmetros específicos que se querem utilizar (como a elevação inicial da superfície livre, o atrito no fundo, a batimetria, os campos de pressões, etc.). A resolução escolhida para estas malhas deverá ter em conta a forma como esses parâmetros afetam a geração, a propagação e a deformação da ondulação.

O SWASH espera que todos os comandos definidos pelo utilizador utilizem unidades do sistema internacional, sendo as direções e ângulos definidos em graus (°).

3.3.2.1. Condições fronteira

As condições fronteira na simulação de ondas de esteira corresponderão à existência de estruturas portuárias, definidas como regiões de profundidade negativa e por zonas abertas por onde as ondas geradas no interior do domínio deverão radiar para o exterior.

Verificou-se que a condição de fronteira de radiação implementada no SWASH não é suficiente para garantir uma correta radiação da onda para o exterior. Por essa razão foram definidas junto às fronteiras

de radiação zonas de esponja (*sponge layers* no SWASH) que absorvem a energia das ondas, fazendo com que estas após penetrarem nessas camadas não voltem a ser refletidas para o interior do domínio de cálculo.

3.3.3. OUTPUT

Os resultados obtidos pelo SWASH são guardados por este em ficheiros sob a forma de tabelas ou de matrizes, sendo apenas fornecidos resultados para as variáveis, pontos e instantes previamente escolhidos pelo utilizador. O utilizador define as grelhas, pontos ou linhas para os quais pretende obter os resultados, qual a janela temporal e o passo de tempo pretendido, e que a variável pretendida (por velocidades, elevação da superfície livre, profundidade total, pressão no fundo, etc.). O processamento de resultados, nomeadamente na forma gráfica, deverá ser feito recorrendo a um terceiro *software*.

Para além dos ficheiros de resultados, o SWASH fornece sempre dois ficheiros de saída. No caso de ocorrência de erros, será fornecido um ficheiro com extensão (.err) que indica o tipo de erro ocorrido; caso o código corra normalmente um ficheiro de nome *norm_end* será criado para referir isso mesmo. Em qualquer dos casos o ficheiro *print*, de extensão (.prt), conterá a informação referente a todo o processo de cálculo, nomeadamente as variáveis definidas, os ficheiros de entrada e saída, definições das malhas de cálculo e ajustes que o SWASH faça automaticamente, como por exemplo a correção do passo de cálculo. Fornece ainda informação sobre os erros ocorridos, sendo normalmente suficiente para perceber o que correu mal e proceder à sua correção.

Em todos os casos corridos neste trabalho foram solicitados vários tipos de ficheiros de saída, alguns para visualização 1D, outros 2D e ainda, mas em menor quantidade, 3D.

Os programas utilizados para o processamento dos dados fornecidos pelo SWASH após a computação foram o Excel e o MATLAB®. Apresentar-se-á a seguir alguns exemplos dos resultados obtidos pelo SWASH.

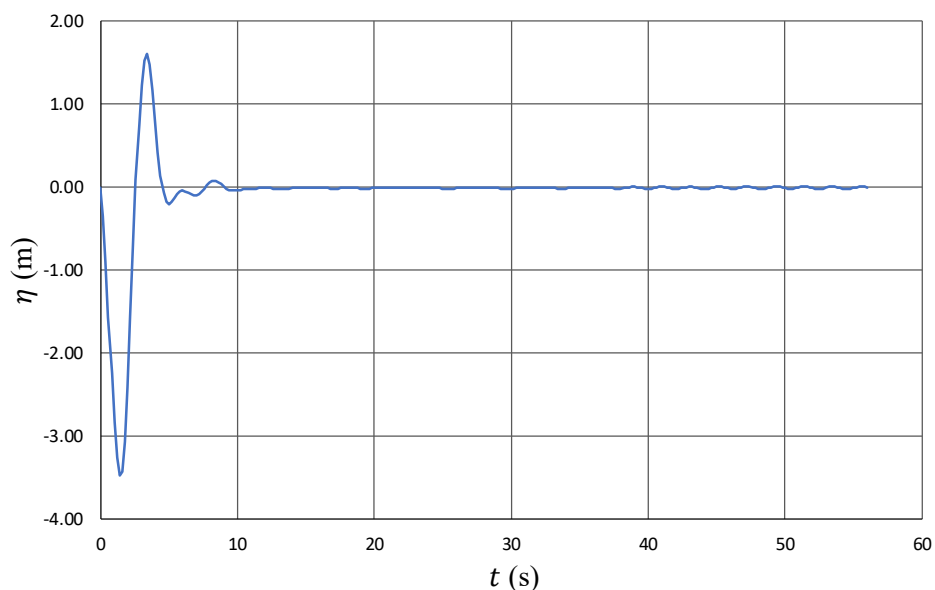


Figura 10: Exemplo de processamento de dados.

3.3.3.1. Altura de onda num ponto, no tempo

A Figura 10 representa um caso de resultados (elevação da superfície livre) solicitados apenas para um ponto numa dada janela temporal. O gráfico foi obtido processando uma série temporal, produzida pelo SWASH e armazenada num ficheiro de texto, utilizando o *software* de produtividade Excel.

3.3.3.2. Altura de onda num tempo, no espaço:

Na Figura 11 representa-se os comandos SWASH para produção de 4 tabelas, correspondendo cada uma delas a uma linha definida no interior do domínio computacional, sendo solicitadas as coordenadas x e y dos pontos da linha, o instante de cálculo, t , a elevação da superfície livre, η , e as componentes u e v , do vetor velocidade, com gravação de resultados a cada 0.2 s. Nas Figuras Figura 12 e Figura 13 são apresentadas as elevações da superfície livre ao longo de dois segmentos de reta para os instantes $t = 24$ s e $t = 32$ s. Estes resultados resultam de um pós-processamento dos resultados armazenados pelo SWASH sob a forma de tabelas. Foi utilizado o MATLAB®, para produção dos gráficos das figuras.

```
TABLE 'line11' NOHEAD 'line11.tbl' XP YP TSEC WATL VEL OUT 000000.000 0.2 SEC
TABLE 'line12' NOHEAD 'line12.tbl' XP YP TSEC WATL VEL OUT 000000.000 0.2 SEC
TABLE 'line13' NOHEAD 'line13.tbl' XP YP TSEC WATL VEL OUT 000000.000 0.2 SEC
TABLE 'line14' NOHEAD 'line14.tbl' XP YP TSEC WATL VEL OUT 000000.000 0.2 SEC
```

Figura 11: Pedido de ficheiros de saída no SWASH.

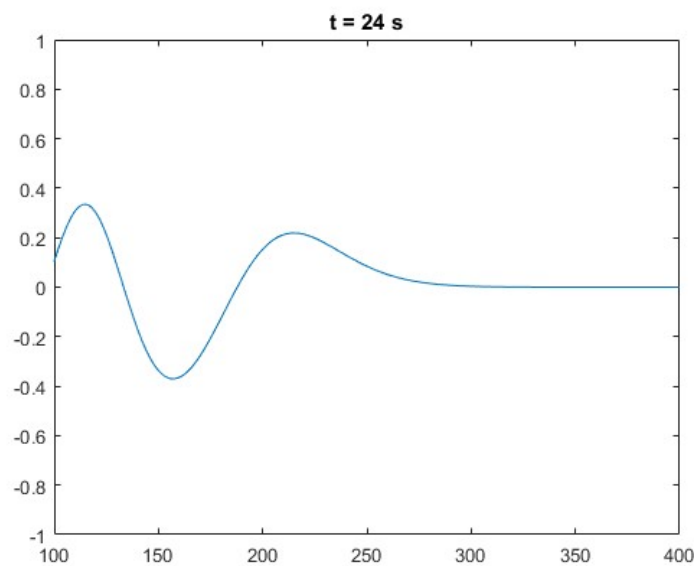


Figura 12: Elevação da superfície livre para $t = 24$ s.

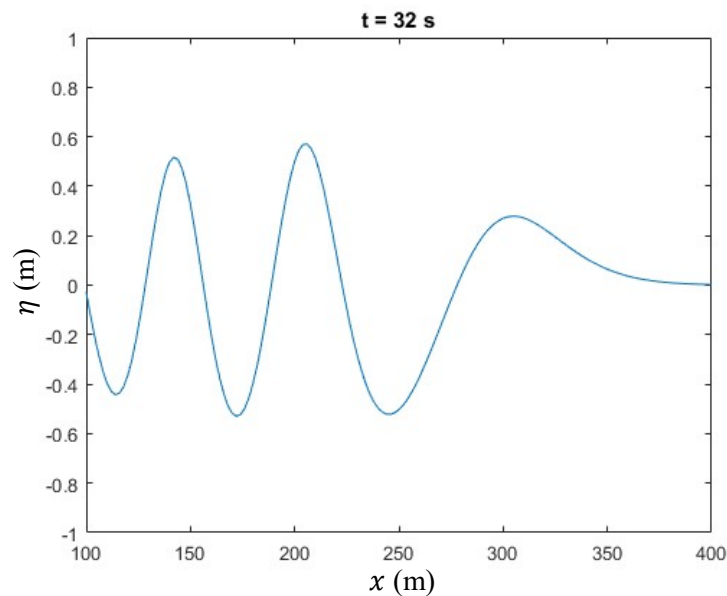


Figura 13: Elevação da superfície livre para $t = 32$ s.

3.3.3.3. Visualização 2DH e 3D do sistema embarcação–ondas

A visualização bidimensional (2DH) é possível armazenando resultados matriciais definidos sobre uma área retangular do domínio computacional ou sobre todo o domínio computacional. Os comandos para produção dos ficheiros de alguns resultados matriciais são mostrados na Figura 14, sendo solicitadas para todos os pontos da malha computacional, uma matriz com a profundidade de cada ponto (batimetria), uma matriz com a coordenada x , uma matriz com a coordenada y , e finalmente uma matriz com a elevação da superfície livre, η . É solicitada uma atriz de elevações da superfície livre a cada 1.0 s de cálculo. O pós-processamento destes resultados é realizado utilizando dois scripts MATLAB, um para visualização bidimensional (ver Figura 15) e outro para processamento tridimensional (ver Figura 16).

```
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'parabolic_zz.mat' LAY 3 BOTLEV OUTPUT 000000.000 1 DAY
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'parabolic_xx.mat' LAY 3 XP OUTPUT 000000.000 1 DAY
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'parabolic_yy.mat' LAY 3 YP OUTPUT 000000.000 1 DAY
$
BLOCK 'COMPGRID' NOHEADER 'parabolic eta.mat' LAY 3 WATLEV OUTPUT 000000.000 1 SEC
```

Figura 14: Pedido de ficheiros de saída no SWASH.

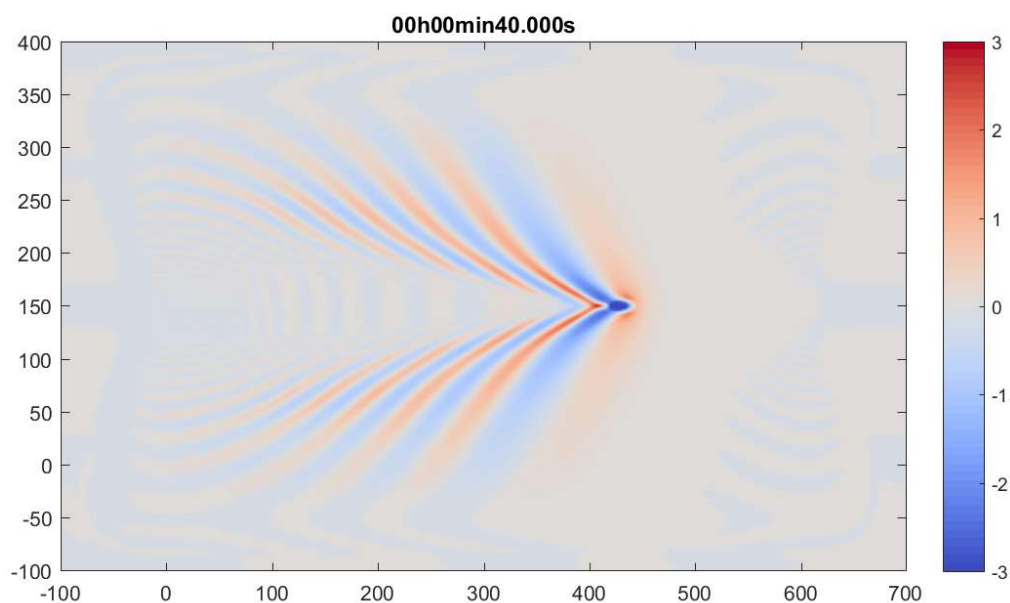


Figura 15: Visualização 2DH das ondas de esteira no instante $t = 40$ s, obtida por pós-processamento.

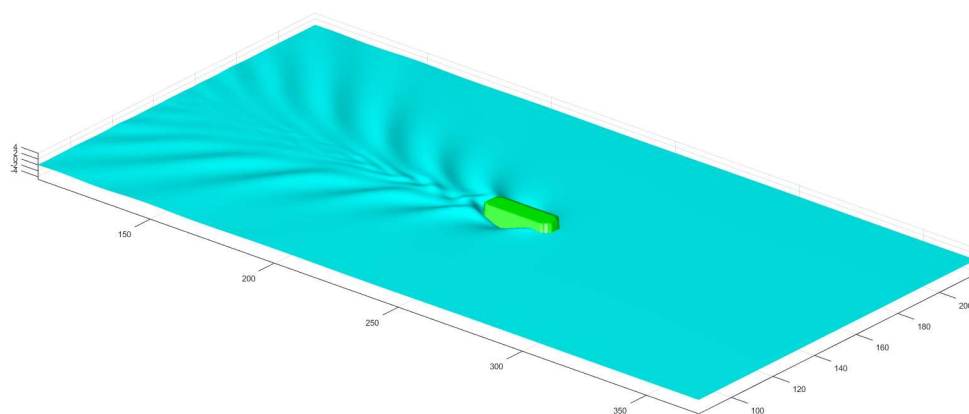


Figura 16: Visualização 3D das ondas de esteira, obtida por pós-processamento.

Este tipo de visualização dos resultados obtidos pela simulação com o SWASH, permite uma mais eficaz análise e interpretação física dos fenómenos verificados na geração e propagação de ondas de esteira, e da sua interação com as estruturas portuárias.

3.4. DEFINIÇÃO DE PARÂMETROS

3.4.1. FICHEIRO DE PRESSÕES

Os ficheiros de pressões que caracterizam o tipo de embarcação geradora das ondas utilizados são diferentes consoante a fase do trabalho. Numa fase muito embrionária foi utilizado um campo de pressões esférico, mais simples de representar e de menores dimensões, diminuindo assim a complexidade e tempo de computação, com fins de calibração de malhas e adquirimento de conhecimento quanto à interação com o software e linhas de código. Posteriormente, numa fase de validação do modelo, havendo aí já um processamento de dados, foi utilizado um campo de pressões que fosse de certa forma semelhante a um barco e que pudesse ser comparado a outros campos de pressões utilizados em trabalhos que, apesar de em modelos numéricos diferentes, abordam o mesmo assunto. Finalmente, para a aplicação ao caso da marina de Leixões, forem utilizados campos de pressões bastante mais complexos e assimétricos em relação ao seu maior lado e que reproduzissem com a alguma precisão as formas e dimensões de embarcações tipo consideradas: um cargueiro, um rebocador e uma lancha de pilotos (ver anexos).

3.4.2. DEFINIÇÃO DA BATIMETRIA

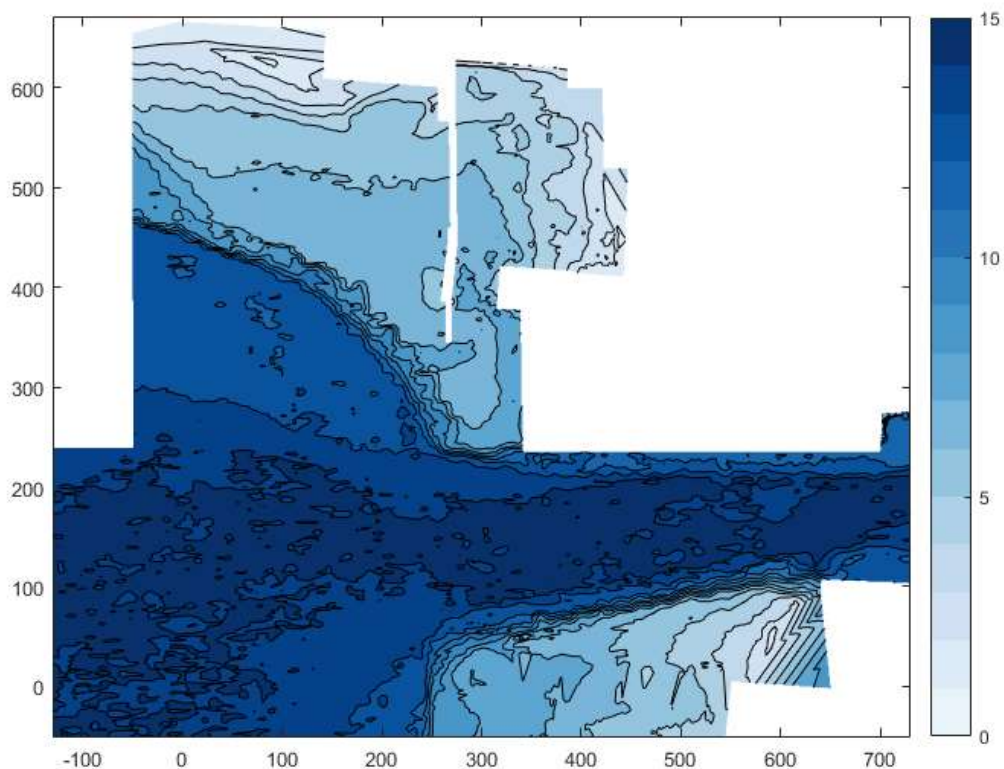


Figura 17: Representação batimétrica da zona de cálculo. A zona mais escura é a mais profunda.

Para os testes de validação foram utilizados fundos a profundidade constante e igual a 10 m.

Na análise ao caso prático (cf. Figura 17), foram utilizados dados batimétricos de um levantamento realizado durante o ano de 2011, data onde as principais estruturas que provocam barreiras físicas na área de influência do *setup* do modelo já existiam, sendo por isso a representação, para efeitos práticos, salvo eventuais dragagens que possam ter alterado a forma dos fundos, é bastante semelhante à que na verdade existe à data da realização desta tese.

Além da batimetria, foram também definidos os limites físicos da zona de estudo com porosidade 0 e por isso com uma reflexão total.

3.4.3. DEFINIÇÃO DO VENTO

Definido como nulo em toda a extensão do domínio das pressões.

3.4.4. DEFINIÇÃO DE OUTROS PARÂMETROS COMO ATRITO, VISCOSIDADE, VEGETAÇÃO, E REBENTAÇÃO.

Não foi considerada nenhuma vegetação em nenhum dos cálculos. Os parâmetros de atrito e viscosidade foram definidos como constantes e iguais a zero. Foi considerada rebentação.

4

CASO DE ESTUDO

4.1. MOTIVAÇÃO PARA O CASO DO NOSSO ESTUDO

As ondas de esteira, isto é, ondas provocadas pelo movimento de corpos em massas de água, são por si só um tema interessante de investigação. Aliando a isso a aplicação a um caso prático onde se observa a formação e mais importante, a interação que estas têm com barreiras que surgem durante a sua propagação acresce valor a esse interesse. A sua ocorrência é indesejável no interior de zonas portuárias, pelo que compreender a sua formação e propagação é fundamental para que se possa encontrar medidas mitigadoras para os seus efeitos. A penetração das ondas de esteira no interior da marina de recreio de Leixões é condicionada pela geometria e posicionamento da sua entrada face aos cais e outras barreiras físicas existentes na proximidade. Um dos aspetos a analisar é a escolha da rota das embarcações que circulam no canal de navegação frente à entrada da marina, procurando determinar qual a rota mais prejudicial em termos de formação de ondas penetrantes naquela doca de recreio. É importante também, após definida a rota a estudar, analisar o efeito de movimentos em sentidos opostos (entrada-saída do porto), e como é que a velocidade e dimensão do barco podem afetar a amplitude, período e ângulo de incidência das ondas.

4.2. CONDIÇÕES FÍSICAS DO LOCAL

O local de estudo da marina de recreio situada a norte no interior do porto de Leixões, identificada na Figura 18. Como se pode perceber pela imagem, as barreiras físicas entre a entrada no canal de navegação e a entrada na marina não são muitas, fazendo prever que uma embarcação que entre ou saia do canal muito próximo da margem norte deste possa provocar oscilações superficiais algo significativas no interior da marina. Para evitar a construção de novas estruturas de defesa, iremos tentar perceber qual a velocidade para cada tipo de embarcação a partir da qual, as oscilações dentro da marina poderão ser consideradas inaceitáveis do ponto de vista do conforto dos utilizadores da mesma.

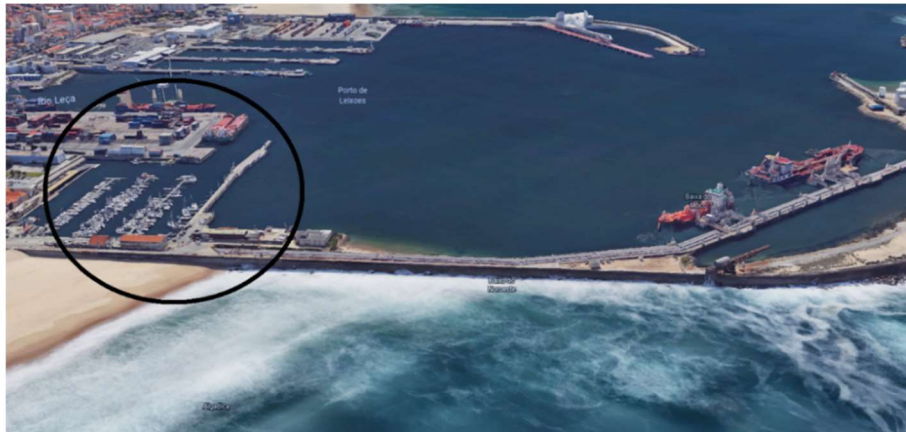


Figura 18: Imagem aérea da marina (fonte: Google Earth).

4.2.1. BATIMETRIA E BARREIRAS

A batimetria foi extraída de um levantamento hidrográfico do porto de Leixões disponibilizado pela APDL. O levantamento no interior da marina data de Setembro de 2008, enquanto os levantamentos do anteporto e do canal de navegação foram efetuados nos meses de Setembro e Outubro de 2011. Desde aquelas datas não terão ocorrido alterações significativas tanto ao nível de fundos como de alterações à geometria dos cais e molhes.

A batimetria na zona de interesse está representada na Figura 19: Batimetria da zona de estudo, Sistema de Coordenadas Militar Hayford-Gauss, Datum Lisboa e profundidade referida ao nível médio do mar., com as coordenadas em quilómetros, enquanto na Figura 20 é utilizado um sistema local adaptado ao cálculo com o SWASH, com as coordenadas em metros. Em ambas as figuras, a profundidade está indicada em metros e referida ao Datum Altimétrico Nacional (nível médio do mar).

4.2.2. ONDULAÇÃO

Neste estudo, a ondulação deve-se única e exclusivamente à deslocação de embarcações no interior do porto, sendo gerada pela evolução de um campo de pressões no interior do domínio de cálculo. O SWASH tem também a capacidade de considerar as ondas de seicha, frequentes em portos, mas como essas ondas, assim como as de maré, são de períodos muito superiores às ondas de esteira, superiores até à própria janela temporal de computação, não faria sentido a sua consideração no cálculo. Em todos os casos, foi considerado um nível de maré nulo. Quanto à ondulação provocada por fenómenos atmosféricos dentro da própria bacia portuária, essa já com um período da ordem de grandeza do período das ondas que se estudam neste trabalho, poderia ter sido considerada. No entanto considerou-se que nesta fase a interação entre os dois tipos de ondulação seria contraproducente dado que dificultaria a análise e compreensão dos fenómenos associados às ondas de esteira. Nesta conformidade, a velocidade do vento sobre o domínio de cálculo foi considerada nula.

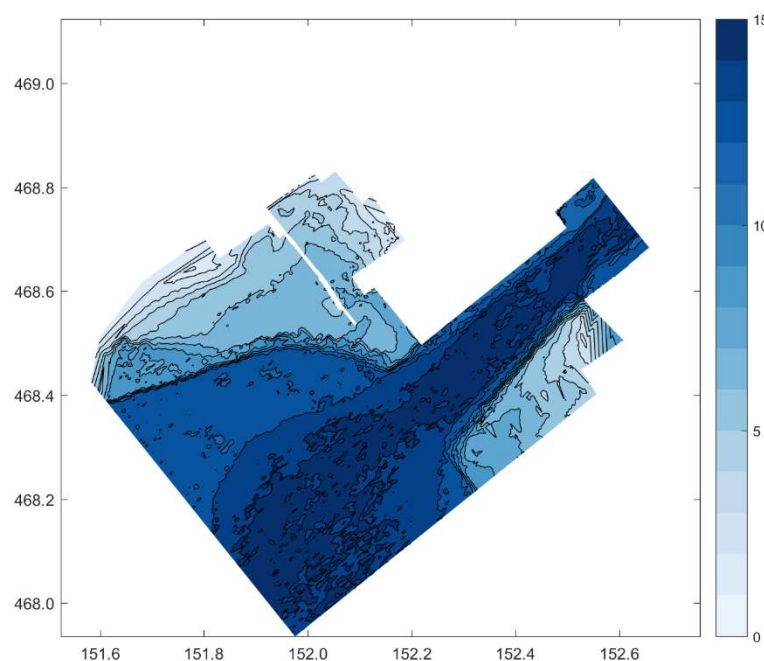


Figura 19: Batimetria da zona de estudo, Sistema de Coordenadas Militar Hayford-Gauss, Datum Lisboa e profundidade referida ao nível médio do mar.

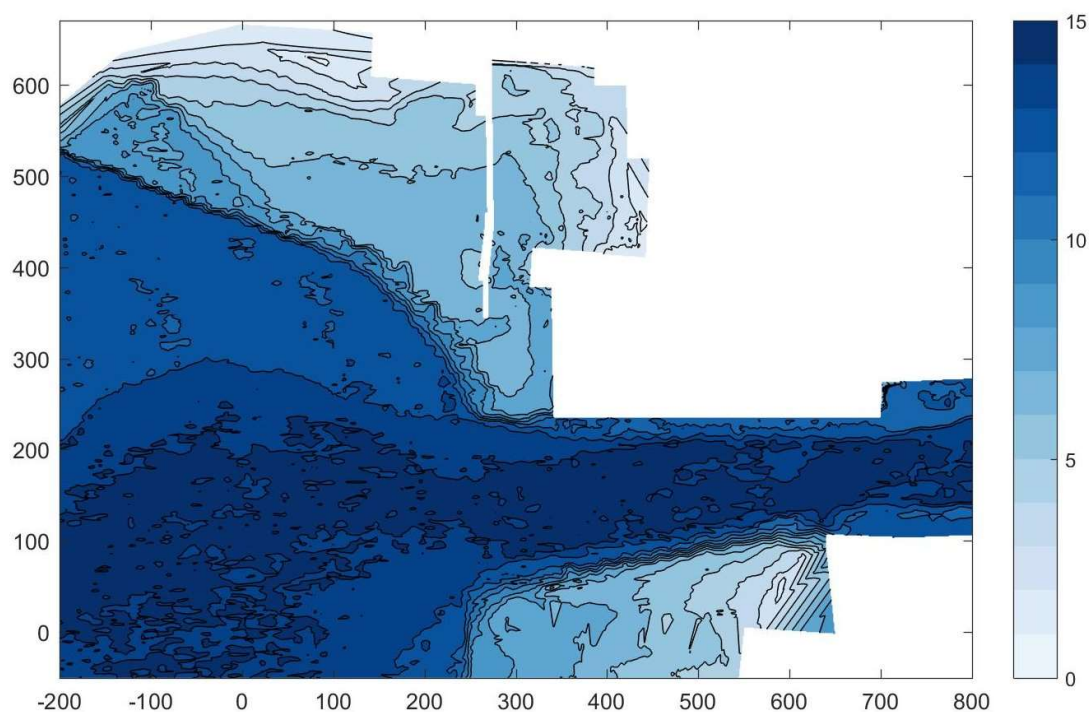


Figura 20: Batimetria da zona de estudo, sistema de coordenadas local (em metros). Profundidade referida ao nível médio do mar.

4.3. VALIDAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

A validação do modelo foi feita em duas fases. Uma onde se pretende verificar a fidedignidade dos resultados do SWASH no que diz respeito ao ângulo de formação das ondas e outra onde se pretende verificar a precisão dos resultados no que toca à elevação da superfície livre obtida pelo modelo numérico.

Estes testes são então enunciados a seguir, onde o teste 2D corresponde à determinação do ângulo das ondas e é o primeiro a ser apresentado, e o teste correspondente ao parâmetro da altura de onda é feito a seguir, denominado por teste 1D.

A validação do modelo numérico foi realizada em duas fases. Numa primeira fase foi analisada a fidedignidade dos resultados do SWASH no que diz respeito ao ângulo de formação das ondas, e numa segunda fase, foi verificada a precisão dos resultados no que toca à elevação da superfície livre obtida pelo modelo numérico.

O primeiro teste de validação recorreu a um modelo 2DH, para comparação com uma solução analítica e com resultados numéricos disponíveis na literatura. O segundo teste recorreu a um problema 1DH para comparação com uma solução analítica aproximada.

4.3.1. VERIFICAÇÃO 2DH DO ÂNGULO DAS FORÇAS DE ESTEIRA

Neste teste pretende-se comparar os resultados obtidos com o SWASH, com a solução analítica de Havelock (1908) para o ângulo das ondas de esteira.

Este teste é inspirado no trabalho de Bayraktar Ersan e Beji (2013), onde é validado um modelo de Boussinesq para uma situação semelhante. O processo utilizado é análogo, e além da comparação com valores analíticos, podem ser também comparados os resultados desse modelo e do modelo SWASH.

O teste consiste em, numa área de 600 m × 300 m, deslocar uma embarcação com dimensões de 28 m de comprimento e 10 m de largura, com fundos a uma profundidade de 10 m, sendo, portanto, a celeridade das ondas (admitindo águas pouco profundas) $c = \sqrt{gh} = 9.9$ m/s. São ensaiadas diferentes velocidades da embarcação de forma a abranger diversas gamas do número de Froude, desde valores subcríticos a valores supercríticos.

O domínio computacional foi discretizado com uma grelha com uma definição $\Delta x = \Delta y = 2$ m. o passo de tempo utilizado foi $\Delta t = 0.1$ s, para toda a gama de números de Froude.

A forma da embarcação, para efeitos de validação, é do tipo *slender*, para uma melhor comparação com a forma utilizada em Bayraktar Ersan e Beji (2013).

O campo de pressões provocado pela embarcação é definido por:

$$p(x, y, t) = \frac{9}{4} \cdot p_0 \cdot \left(1 - \frac{(x - u \cdot t)^2}{L^2}\right) \cdot \left(1 - \frac{y^2}{B^2}\right) \quad (29)$$

onde $p_0 = M \cdot g / (C \cdot L)$, sendo que M representa a massa de água deslocada, L é meio comprimento do barco, B é meia largura do barco, t é o instante de tempo, g é a aceleração gravítica e u é a velocidade do barco. O número de Froude foi definido como

$$Fr = Fr_h = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (30)$$

O campo de pressões assim definido encontra-se representado na Figura 21.

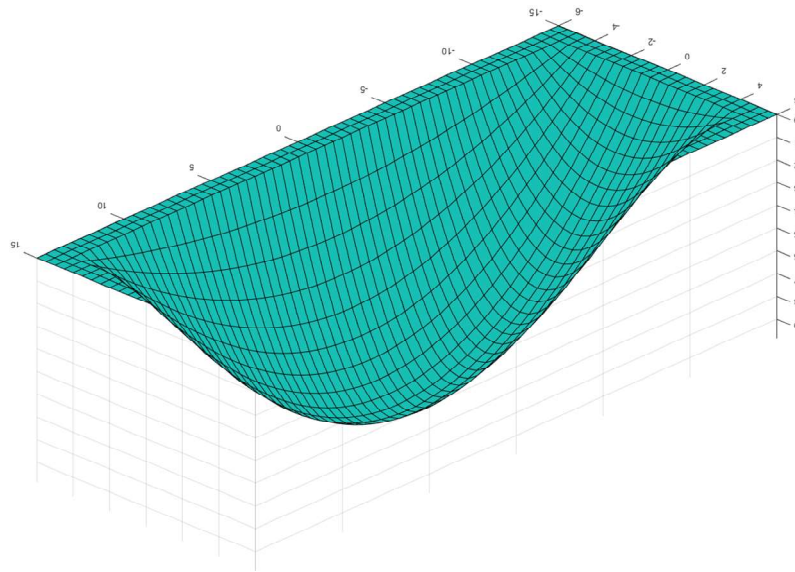


Figura 21: Representação do campo de pressões $p(x, y, t)$.

Após definido o campo de pressões, foram gerados campos de pressão espaçados de $\Delta t = 1$ s. O SWASH foi executado, considerando-se que não existiria rebentação nem atrito no fundo. Foram utilizadas camadas de esponja com a espessura de 100 m, nas quatro fronteiras exteriores, expandindo a área coberta pelo domínio computacional para $800 \text{ m} \times 500 \text{ m}$. Desta forma, previne-se a eventual existência de reflexão nas fronteiras.

4.3.1.1 ÂNGULO DE ESTEIRA / CUNHA DE KELVIN

Pretende analisar o ângulo que as ondas de esteira formam com o eixo da trajetória da embarcação e variação desse ângulo com o número de Froude.

Segundo Soomere (2007), quando uma embarcação se move sobre uma superfície de água, as variações de pressão à superfície geram um trem de ondas. A primeira descrição desse trem de ondas foi dada por Froude (1877), e mais tarde a teoria foi formalizada por Kelvin (1887), que derivou analiticamente a expressão para o ângulo θ_k , formado pela interceção das ondas divergentes com as transversais que são formadas aquando da passagem de um corpo por uma massa de água (ver Figura 22). Posteriormente, Havelock (1908) desenvolveu esse trabalho para resolver as descontinuidades que existiam no modelo de Kelvin e incluir os efeitos de águas profundas.

O caso clássico no estudo da cinemática das ondas de esteira é determinar qual o padrão de propagação das cristas (e cavas) das ondas à luz de uma teoria linear, num meio não viscoso e sem tensão superficial, pelo que a solução analítica poderá diferir da solução numérica obtida pelo SWASH apresenta já que este considera a viscosidade da água e inclui os efeitos da não linearidade. Considera-se, no entanto, que a aproximação é suficientemente boa para a validação do modelo possa ser realizada por este método.

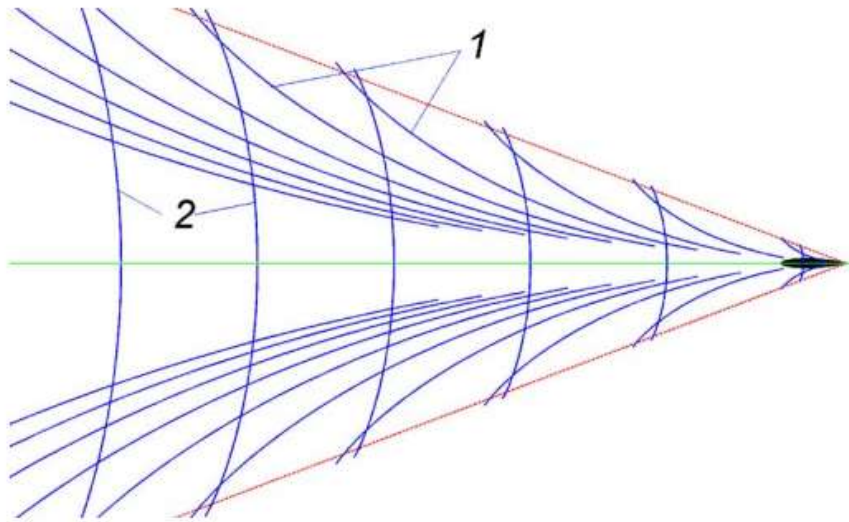


Figura 22: Obtenção de θ_K , da interseção entre as ondas transversais e divergentes. Ondas divergentes (1), ondas transversais (2) (adaptado de Soomere, 2007).

Tendo em conta a construção da Figura 23, conclui-se que, o padrão das ondas geradas pelo movimento de uma embarcação que se move com uma velocidade u constante só poderá ser estacionário se a componente da onda que se propaga com um ângulo θ em relação à linha de trajetória tiver uma velocidade de fase $c_f = u \cos \theta$.

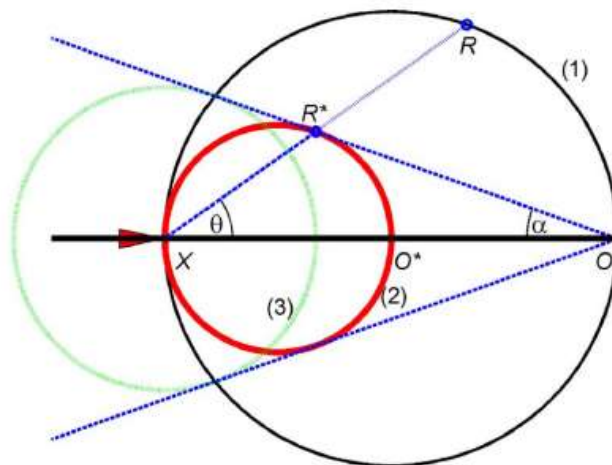


Figura 23: Identificação das zonas de interseção de ondas (adaptado de Soomere, 2007).

Se as velocidades de fase, c_f , e de grupo, c_g , fossem iguais, a energia das ondas estacionárias geradas num determinado ponto X ocuparia o círculo (1) da Figura 23 mas como a energia das ondas, teoricamente, se propaga com a velocidade de grupo e $c_g \leq c_f$ para ondas de superfície, as mesmas

dever-se-iam encontrar no círculo (2) onde o diâmetro corresponde a $c_g c_f^{-1}$ vezes o diâmetro do círculo (1), pelo que a ondulação apenas se pode verificar na interseção destes dois conjuntos, representado pela linha a tracejado azul e que se denomina como cunha, ou região de Kelvin. O ângulo α que caracteriza essa linha é dado por

$$\sin(\alpha) = \frac{1}{2c_g c_f^{-1} - 1} \quad (31)$$

Para águas profundas, a relação de dispersão é dada por $\omega = \sqrt{gk}$, onde ω é a frequência angular das ondas e $k = 2\pi/\lambda$ é o número de ondas, sendo λ o comprimento de onda, pelo que $c_f = \omega/k$. Como a região de Kelvin é delimitada pela condição $c_g \leq c_f$, para águas profundas, o círculo (1) tem o dobro do diâmetro do círculo (2), dado que neste caso, $c_f = 2 c_g$, e assim, substituindo na equação (31), vem

$$\sin \alpha = \frac{1}{3} \Leftrightarrow \alpha \approx 19.47^\circ \quad (32)$$

Conclui-se que, para águas infinitamente profundas, o ângulo de esteira não depende da velocidade a que a embarcação se desloca. Esta mesma conclusão pode ser atingida de outra maneira, talvez mais intuitiva e certamente mais útil para a apreciação do caso que aqui se estuda.

Havelock (1908), que desenvolveu o trabalho feito por Kelvin (1887), verificou que o padrão do ângulo das ondas geradas pelo movimento de uma pressão à superfície tinha variações diferentes para números de Froude subcríticos e supercríticos. Para a determinação do ângulo α , considere-se a formulação do número de Froude em relação à profundidade (30). Considere-se também as expressões analíticas para o valor do ângulo α que Havelock derivou:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\sqrt{8(1-n)}}{3-n}\right) \text{ se } Fr \leq 1 \quad (33)$$

e

$$\alpha = \arccos\left(\sqrt{\frac{1}{Fr^2}}\right) \text{ se } Fr > 1 \quad (34)$$

A equação (33) é resolvida para um dado valor do domínio subcrítico do número de Froude calculando um kh por iteração de fazendo

$$m(3-n) = 2 Fr^2 \quad (35)$$

onde

$$m = \frac{\tanh(kh)}{kh} \quad (36)$$

e

$$n = \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \quad (37)$$

Podendo-se então resolver a seguinte equação em relação a kh :

$$2 \text{Fr}^2 = \frac{\tanh(kh)}{kh} \left(3 - \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (38)$$

Após determinado o valor de kh , calcula-se o valor de n através da expressão (37), que substituindo em (33) nos dará finalmente o valor do ângulo α . No entanto, é interessante notar que fazendo tender Fr para zero, o que pode representar um movimento em águas profundas, veremos que a mesma expressão nos conduz a um valor já conhecido e apresentado anteriormente, o ângulo da cunha de Kelvin. É essa mesma assíntota que podemos verificar no gráfico da Figura 26, e que é utilizado para validação, já que a mesma tendência se verifica nas medições efetuadas aos resultados obtidos pelos SWASH.

Outra conclusão também importante que se permite deduzir das expressões de Havelock (33) e (34), é que, à medida que o número de Froude diminui, as ondas divergentes tornam-se menos dominantes passando o padrão a ser mais fortemente influenciado pelas ondas transversais. Esse fenómeno é bem perceptível nas Figuras 24 e 25.

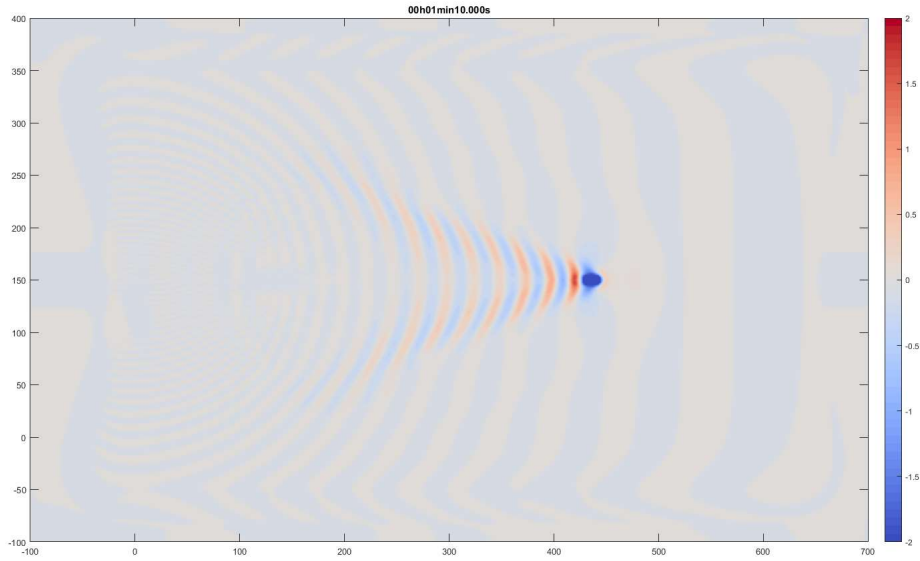


Figura 24: Ondas de esteira para $\text{Fr} = 0.63$.

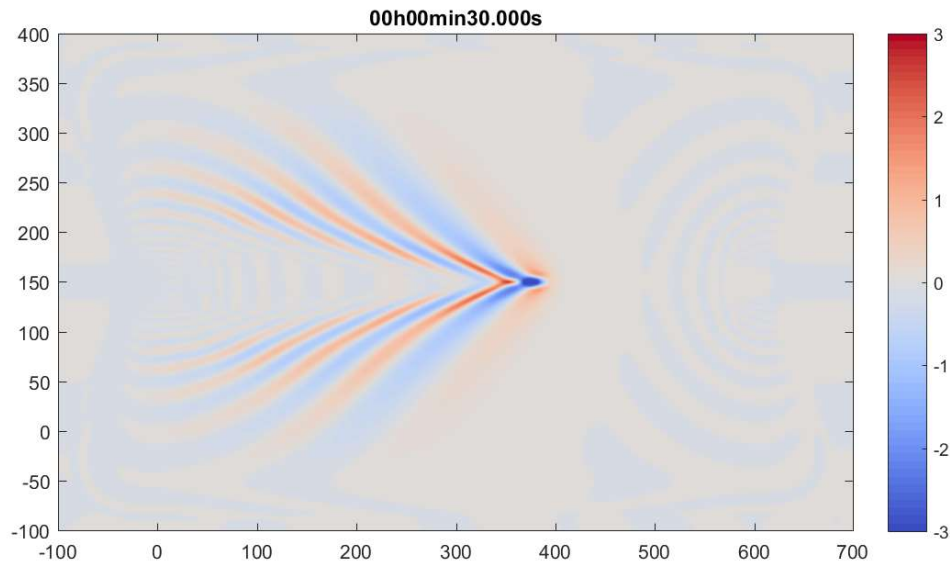


Figura 25: Ondas de esteira para $Fr = 1.30$.

4.3.1.2 VALIDAÇÃO DO ÂNGULO α

A Figura 26, adaptada de David et al. (2017) representa um domínio rodeado por uma camada de esponja onde se move uma embarcação em linha reta a velocidade constante e onde as áreas interiores sombreadas representam a formação do ângulo, ou cunha de Kelvin θ_K , ou, à medida que Fr aumenta, o ângulo de esteira função desse número, θ_{Fr} , e que neste trabalho se se identifica como α .

Como referido anteriormente, recriou-se, procurando manter as características principais para permitir uma comparação, mas com algumas modificações e obviamente num modelo numérico diferente, um teste onde se mediu o ângulo formado pelas ondas de esteira geradas por uma embarcação.

A validação é então verificada pela concordância que houver entre os valores numéricos obtidos pelo SWASH e os valores analíticos de Havelock (1908). Far-se-á também uma comparação com os valores numéricos obtidos por Bayraktar Ersan e Beji (2013) com um modelo de Boussinesq.

Apresentam-se alguns exemplos da medição do ângulo, e na Tabela 2 a comparação dos valores obtidos, representados também no gráfico da Figura 27.

A precisão da medição do ângulo é dada à unidade. É importante referir que a medição do ângulo é feita de maneira diferente para $Fr \leq 1$ e $Fr > 1$, como se poderá apreciar nas Figuras 28 a 31 e, como é detalhado em Havelock (1908).

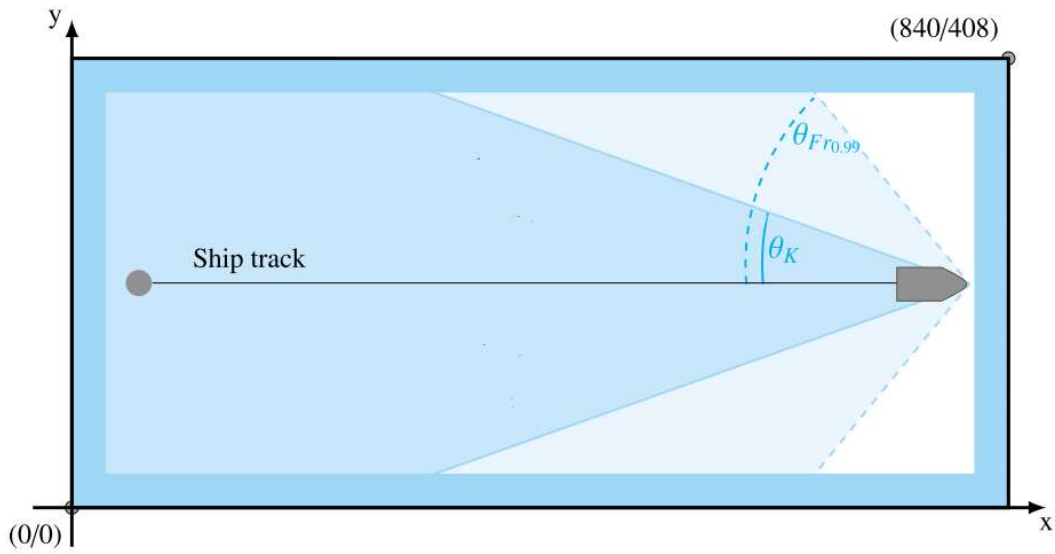


Figura 26: Ângulos θ_K e θ_{Fr} (adaptado de David et al, 2017).

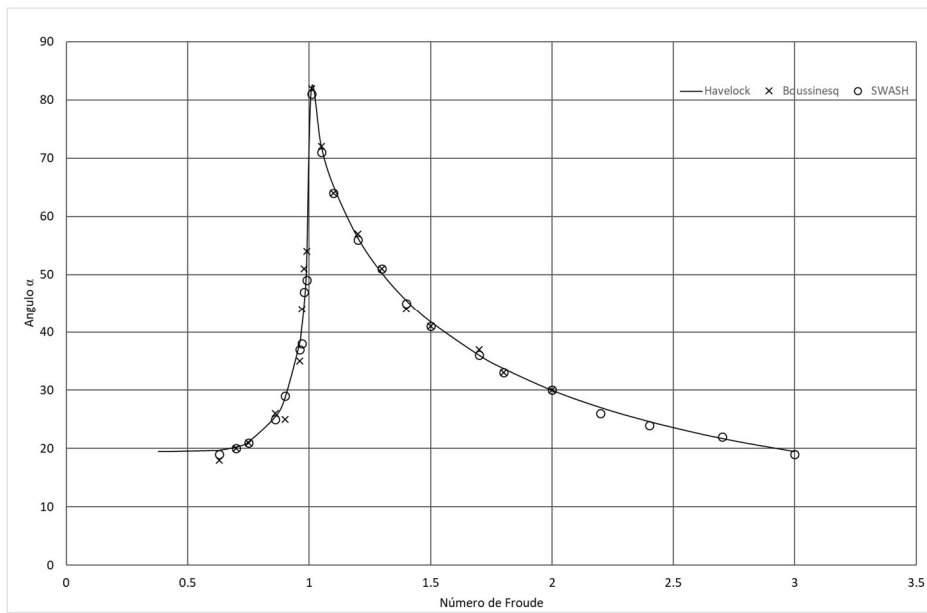


Figura 27: Ângulo de esteira, α , em função do número de Froude, Fr_h .

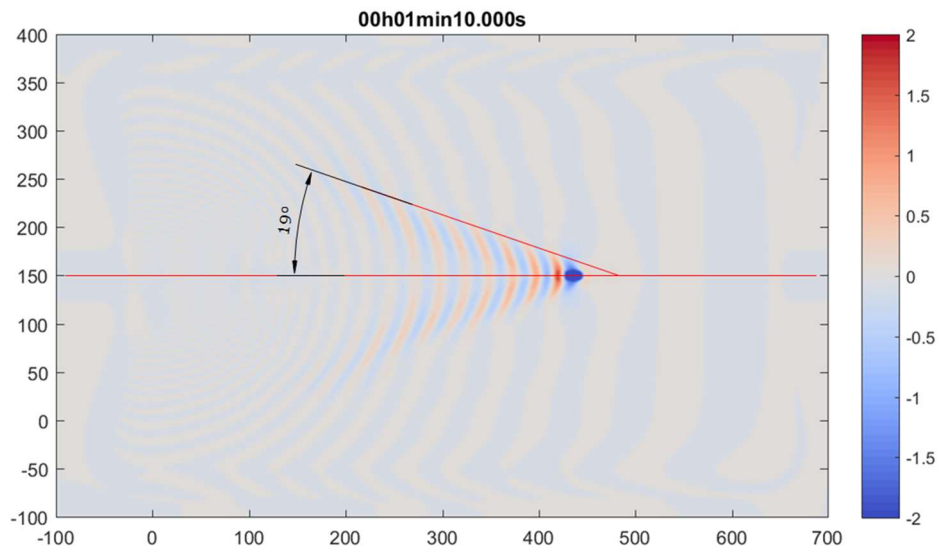


Figura 28: Ângulo de esteira para $Fr = 0.63$.

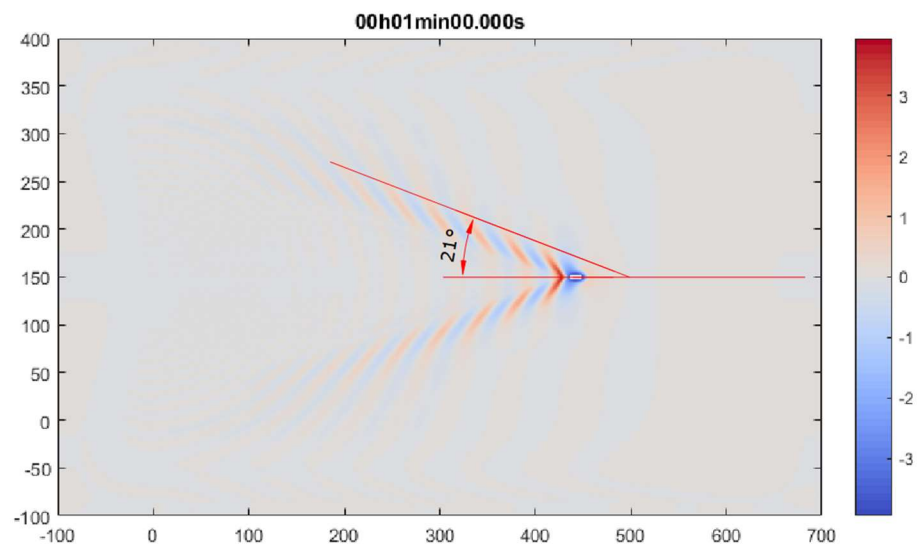


Figura 29: Ângulo de esteira para $Fr = 0.75$.

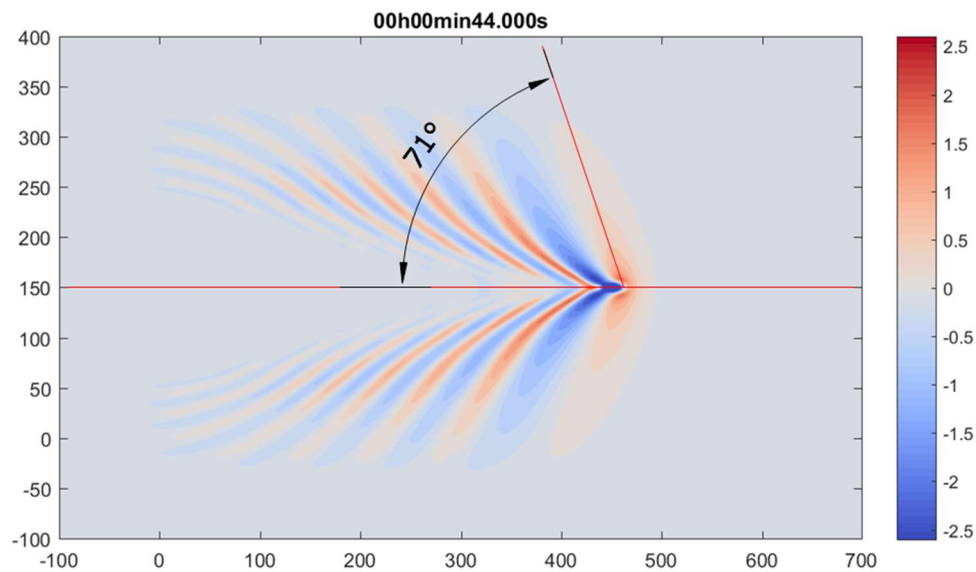


Figura 30: Ângulo de esteira para $Fr = 1.05$.

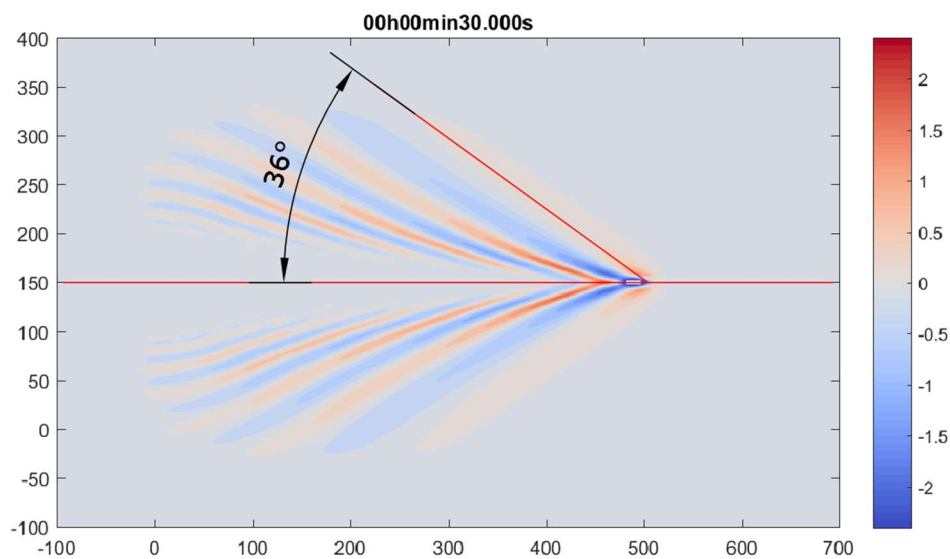


Figura 31: Ângulo de esteira para $Fr = 1.70$.

Como se pode verificar da leitura da Tabela 2 como do gráfico da Figura 27, os valores do ângulo de esteira foram obtidos para uma gama de valores do número de Froude mais alargada do que os calculados por Bayraktar Ersan e Beji (2013), por forma a validar o modelo para valores bastante elevados desse parâmetro. Verifica-se que o erro médio na determinação do ângulo de esteira com o SWASH, é de 2.05 % com um desvio padrão de 1.70 %, valores calculados apenas até $Fr = 2.0$ de forma a poder comparar com o obtido com o modelo de Boussinesq, para o qual os valores para o erro médio e para o desvio padrão foram respetivamente 4.0 % e 4.2 %, respectivamente. Conclui-se, portanto, que no que

concerne à precisão da representação do ângulo de esteira, o modelo SWASH, é mais preciso do que o modelo de Boussinesq utilizado por Bayraktar Ersan e Beji (2013).

Estes resultados são importantes, porque refletem o quão bem as componentes de velocidade u e v das equações governativas (24), (25) e (26) são calculadas pelo modelo numérico. Com isto verifica-se que o modelo é válido para representações do ângulo formado pelo movimento de um corpo numa massa de água para qualquer número de Froude compreendido dentro do intervalo estudado e por isso consegue-se obter uma boa segurança no que ao ângulo de esteira das ondas diz respeito assim, como uma representação 2DH e 3D corretas.

No entanto, a informação que se obtém destes testes nada indica acerca da qualidade dos resultados em termos da elevação da superfície livre. Para estudar esse aspeto, foi efetuado um segundo teste 1DH, a uma dimensão, e a que se dedica o próximo capítulo.

Tabela 2: Ângulos de esteira, α . Soluções analítica e numéricas, em função do número de Froude, Fr.

Fr	Ângulo de esteira, α				
	Boussinesq (numérico)	SWASH (numérico)	Havelock (analítico)	Erro relativo	
				Boussinesq	SWASH
0.63	18	19	19.69	8.58	3.50
0.70	20	20	20.26	1.28	1.28
0.75	21	21	21.10	0.47	0.47
0.86	26	25	25.36	2.52	1.42
0.90	25	29	28.50	12.28	1.75
0.96	35	37	37.78	7.36	2.06
0.97	44	38	40.69	8.13	6.61
0.98	51	47	44.66	14.20	5.24
0.99	54	49	51.01	5.86	3.94
1.01	82	81	81.93	0.09	1.14
1.05	72	71	72.25	0.35	1.73
1.10	64	64	65.38	2.11	2.11
1.20	57	56	56.44	0.99	0.78
1.30	51	51	50.28	1.43	1.43
1.40	44	45	45.58	3.47	1.27
1.50	41	41	41.81	1.94	1.94
1.70	37	36	36.03	2.69	0.08
1.80	33	33	33.75	2.22	2.22
2.00	30	30	30.00	0.00	0.00
2.20		26	27.04		3.85
2.40		24	24.62		2.52
2.60		23	22.62		1.68
2.70		22	21.74		1.20
3.00		19	19.47		2.41
Erro médio				4.00	2.05
Desvio padrão				4.22	1.70

4.3.2. VALIDAÇÃO 1DH DA ELEVAÇÃO DA SUPERFÍCIE LIVRE

O objetivo deste teste é avaliar a magnitude da elevação da superfície livre calculada pelo modelo SWASH. Comparando-a com uma solução analítica linear.

4.3.2.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA

As equações de águas pouco profundas (24) e (25) podem ser linearizadas e simplificadas para o caso de profundidade constante e ondas propagando-se na direção OX (problema 1DH). Assim, da equação da continuidade (24) vem:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} = 0 \quad (39)$$

Sendo o problema 1DH, ter-se-á que

$$\frac{\partial(h\tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(h\tau_{yy})}{\partial y} = 0 \quad (40)$$

e, devido à linearidade.

$$u \frac{\partial u}{\partial x} = v \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (41)$$

Além disso, se se considerar que a profundidade é constante e o atrito nulo, ie. $c_f = 0$, pelo que resolvendo o integral, substituindo (40) e (41) e trocando os membros em (25) se obtém:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (42)$$

onde p é a pressão à superfície do mar.

Se $p = 0$, as equações (39) e (42) têm como solução as equações de onda livre com

$$\eta_1 = a_1 f(x - ct) \quad (43)$$

$$\eta_2 = a_2 f(x - ct) \quad (44)$$

$$u_1 = \frac{c}{h} a_1 f(x - ct) \quad (45)$$

e

$$u_2 = -\frac{c}{h} a_2 f(x - ct) \quad (46)$$

onde $f(x - ct)$ é uma função arbitrária que define o campo de pressões, a_1, a_2 são constantes arbitrárias e $c = \sqrt{gh}$.

Para $f(x, t)$ dado por (Bayraktar Ersan e Beji, 2013)

$$f(\chi) = e^{-\left(\frac{\chi}{250}\right)^2} \quad (47)$$

com $\chi = x - u t$, se $p = p_0 f(x - ut)$ onde u é a velocidade do campo de pressões na direção do eixo OX com sentido positivo, então as soluções do sistema passam a ser $\eta_3 = a_3 f(x - ut)$ e $u_3 = b_3 f(x - ut)$. Substituindo η_3 , u_3 e p em (42), vem que

$$a_3 = -\frac{h p_0}{\rho(c^2 - u^2)} \quad (48)$$

e

$$b_3 = -\frac{u p_0}{\rho(c^2 - u^2)} \quad (49)$$

Finalmente, considerando a condição de que o deslocamento total e a velocidade deverão ser nulas para o instante de tempo $t = 0$, obtém-se o sistema de equações

$$\begin{aligned} \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 &= 0 \\ u_1 + u_2 + u_3 &= 0 \end{aligned} \quad (50)$$

Substituindo (48) e (49) em (50) resolve-se o sistema obtendo um $a_1 = (c + u)h p_0 / 2\rho c(c^2 - u^2)$ e $a_2 = (c - u)h p_0 / 2\rho c(c^2 - u^2)$, obtendo assim a solução final de (39):

$$\eta = \frac{h p_0}{2\rho c(c^2 - u^2)} [(c + u)f(x - ct) + (c - u)f(x + ct) - 2cf(x - ut)] \quad (51)$$

e

$$u = \frac{p_0}{2\rho c(c^2 - u^2)} [(c + u)f(x - ct) - (c - u)f(x + ct) - 2uf(x - ut)] \quad (52)$$

Para efeitos de validação foi então definido que $p_0 = -5000$ Pa, $\rho = 1000$ kg/m³, $g = 9.81$ m/s² e profundidade constante $h = 20$ m. O comprimento total do domínio é de 20 000 m com células $\Delta x = 20$ m e um passo de tempo $\Delta t = 1$ s. O campo de pressões tem posição inicial no meio do domínio, $x_0 = 10\,000$ m. Foram testados 3 casos, para $u = 0$ m/s, $u = 10$ m/s e $u = 18$ m/s correspondendo a números de Froude nulo, subcrítico e supercrítico, respetivamente $Fr = 0.0$, $Fr = 0.7$ e $Fr = 1.3$.

Como é possível confirmar através da inspeção das Figuras 32 a 37, os resultados são numéricos e são praticamente idênticos o campo de pressões não se movimenta. No entanto, para os casos em que há movimento do campo de pressões, verifica-se um ligeiro erro de fase, bem como de amplitude. Assim, para o escoamento subcrítico, a solução numérica apresenta uma amplitude da crista ligeiramente superior à da solução analítica, enquanto que para o escoamento supercrítico, é a amplitude da cava que é ligeiramente superior na solução numérica, quando comparada com a solução analítica. Estas pequenas divergências entre as soluções numérica e analítica são expectáveis, dado que a solução analítica, sendo linear, é de primeira ordem, enquanto a solução numérica é de ordem superior. Os resultados obtidos são bastante satisfatórios, permitindo obter um elevado grau de confiança no SWASH no que respeita aos valores calculados para a elevação da superfície livre.

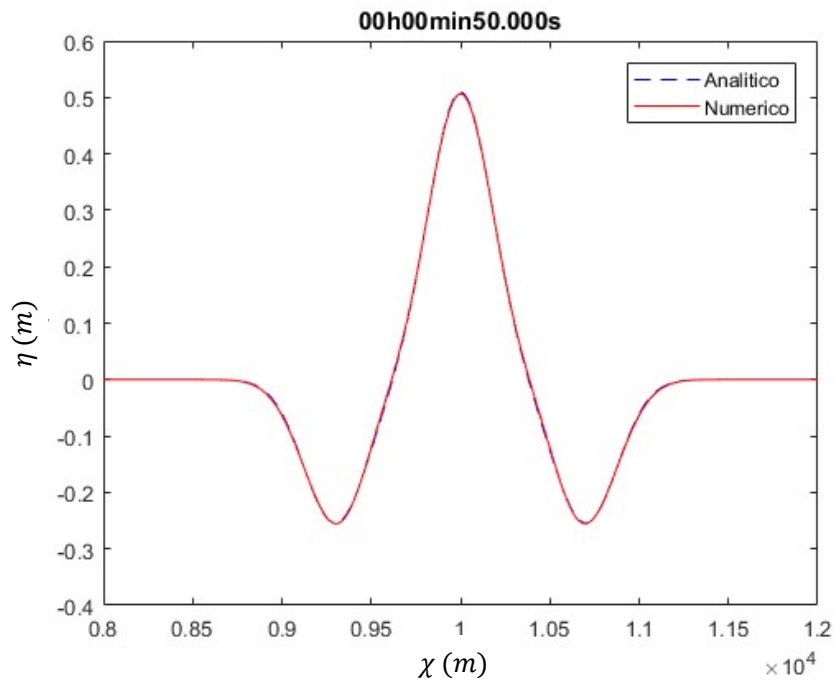


Figura 32: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 0$ m/s e $t = 50$ s.

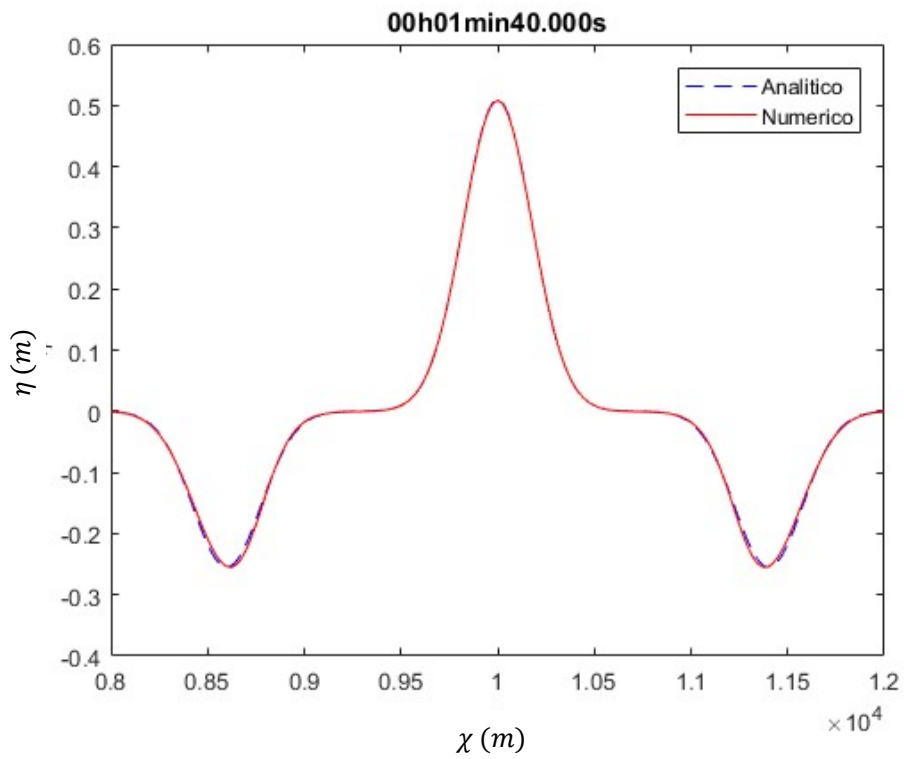


Figura 33: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 0$ m/s e $t = 100$ s.

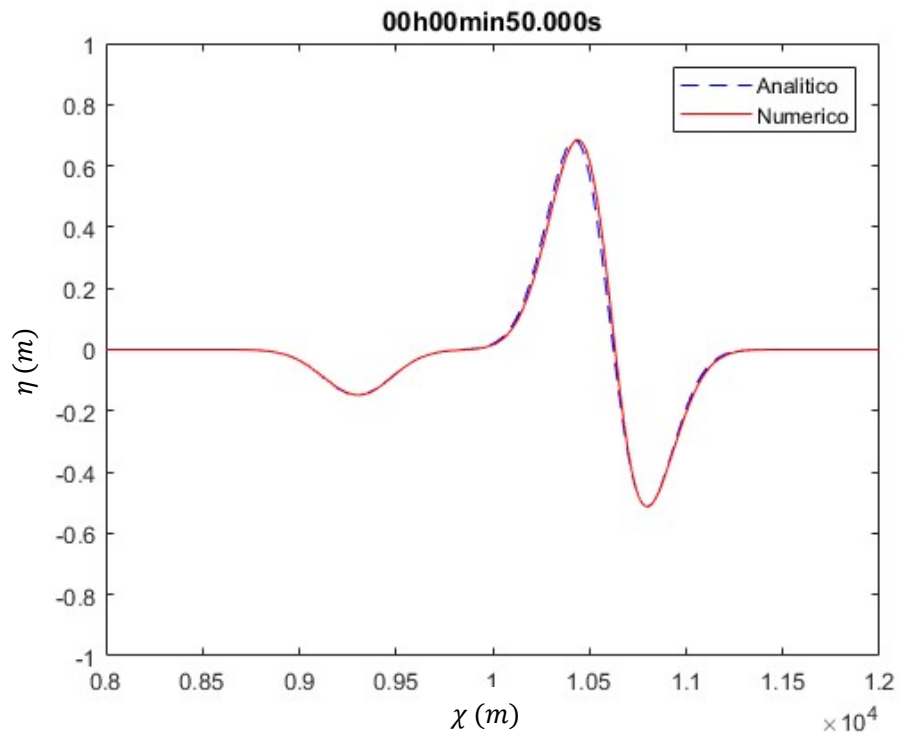


Figura 34: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 10$ m/s e $t = 50$ s.

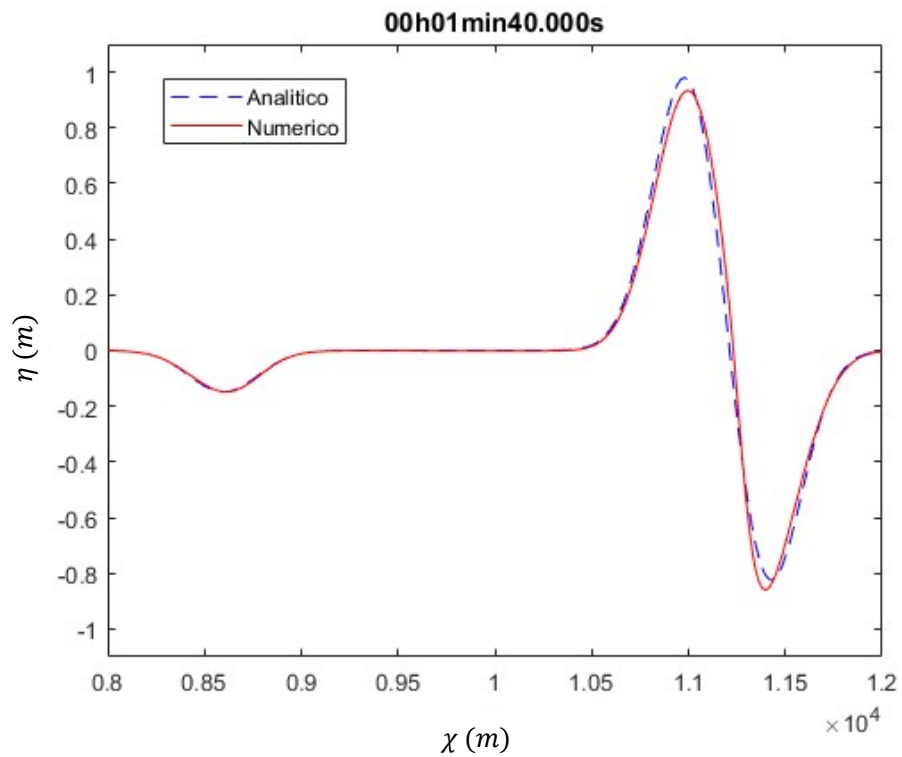


Figura 35: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 10$ m/s e $t = 100$ s.

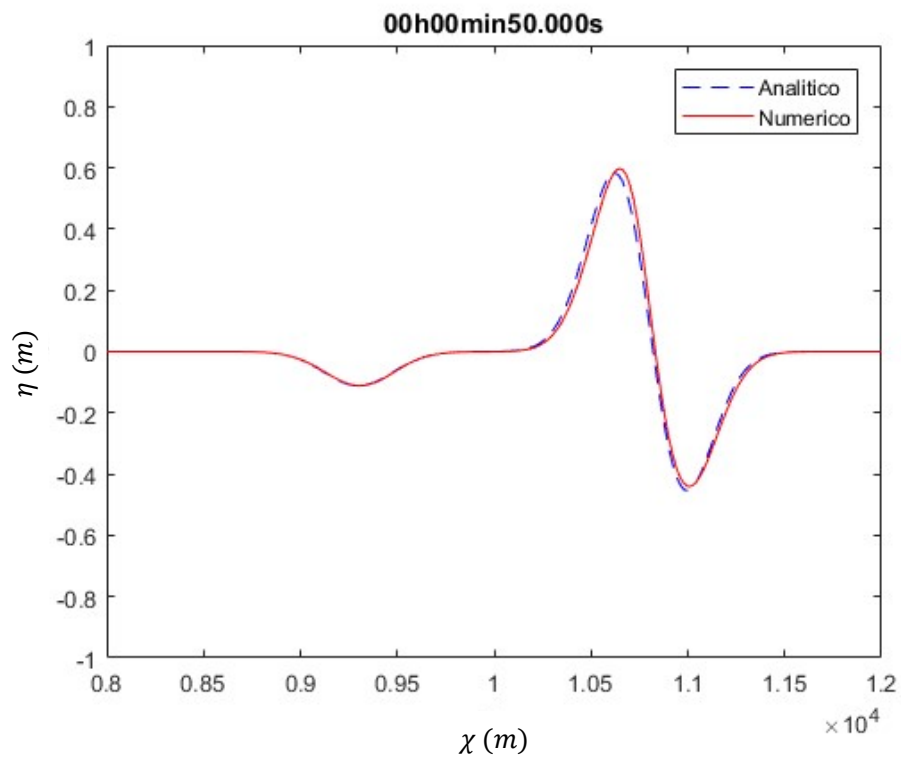


Figura 36: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 18$ m/s e $t = 50$ s.

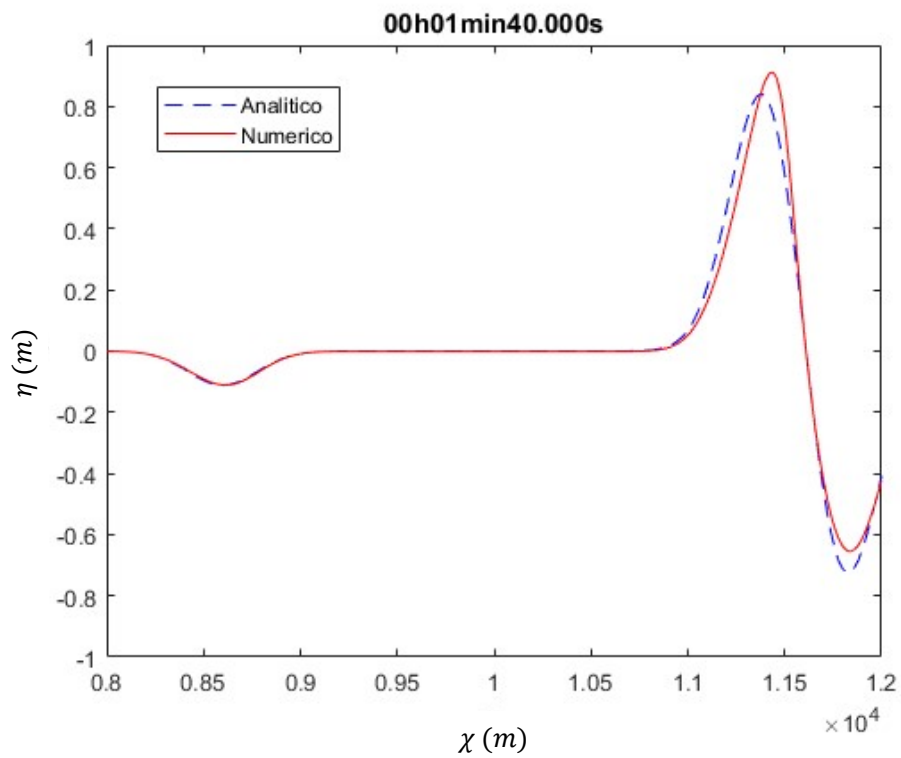


Figura 37: Comparação da solução analítica com a solução numérica para $u = 18$ m/s e $t = 100$ s.

5

RESULTADOS

Os resultados apresentados neste capítulo foram obtidos fazendo correr o SWASH com uma série de parâmetros comuns a praticamente todos os casos:

- malha de cálculo $860 \text{ m} \times 720 \text{ m}$, $\Delta x = \Delta y = 1.0 \text{ m}$;
- passo de tempo para cálculo $\Delta t = 0.025 \text{ s}$;
- aceleração gravítica $g = 9.81 \text{ m/s}^2$;
- massa volúmica da água $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$;
- temperatura da água $T = 4 \text{ }^\circ\text{C}$;
- coeficiente de viscosidade dinâmica $\mu = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$;
- duas camadas verticais;
- malha da batimetria com as mesmas dimensões da malha de cálculo;
- malha para velocidade do vento (obrigatória) de valor zero;
- esponjas absorventes a Sul, Este e Oeste;
- coeficiente de atrito de Manning $n = 0.02 \text{ m}^{-1/3}\cdot\text{s}$;
- viscosidade vertical e horizontal nula;
- com rebentação;
- modo não hidrostático;
- sem vegetação;
- sem força baroclínica;
- sem transporte de sedimentos;
- sem porosidade;
- modo dinâmico a duas dimensões;
- coordenadas cartesianas.

Foram analisados três casos distintos entre si pelo tipo de embarcação e, para cada embarcação, já que todas têm velocidades diferentes de propagação no interior do porto, diferentes valores para o número de Froude, considerando em todos eles que Fr dependeria apenas da velocidade já que o percurso em linha reta que o barco percorre coincide com o canal de navegação cujas águas, assim como no anteporto onde a embarcação começa, podem ser consideradas águas profundas. Mais tarde verificou-se que a análise não deveria ser feita exclusivamente assim, pois o número de Froude predominante pode ser outro para embarcações de maiores dimensões e passar a ser regido pelo comprimento do mesmo, isto é $Fr = u/\sqrt{gL}$, onde L é o comprimento do barco. A única exceção a este último comentário verifica-

se quando se analisa o que acontece quando um barco de pequenas dimensões entra no interior da marina perpendicularmente à sua entrada.

Os três tipos de embarcação utilizados são:

- cargueiro;
- rebocador;
- lancha de pilotos.

A malha de cálculo, como referido anteriormente, comum a praticamente todos os casos, foi definida de forma a abranger uma área suficientemente alargada para o cálculo que se pretende fazer, com limite para a quantidade de dados batimétricos disponíveis, que não foram restritivos neste caso.

5.1. EMBARCAÇÃO TIPO CARGUEIRO

Com um deslocamento de 6000 t e com 100 m de comprimento, 28 m de largura e um calado de 5.35 m, esta é a maior embarcação estudada. As suas dimensões e formas basearam-se no navio-cargueiro Atlantis Alhambra (cf. Figura 38). A malha de pressões tem dimensões 860 m \times 40 m ancorada no ponto $(x_0, y_0) \equiv (-130, 148)$ m.



Figura 38: Cargueiro Atlantis Alhambra (© Udo Mitzlaff, MarineTraffic.com).

Foi utilizada uma velocidade de $u = 5$ kn, i.e. $u = 2.57$ m/s, que se considerou uma velocidade razoável para circulação no interior do porto. Para esta velocidade, e considerando fundos de 20 m, já que na simulação este navega no meio do canal de navegação, chega-se a um número de Froude de $Fr_h = 0.184$, no entanto, com $L = 100$, ter-se-á $Fr_L = 0.082$, e deve ser este o considerado, já que esta embarcação apenas navega no canal de navegação, onde se considera, para este caso, em águas pouco profundas.

5.1.1. SENTIDO PARA O INTERIOR DO PORTO

Considerando as movimentações normais no interior do porto, para um barco do tipo Cargueiro, apenas faz sentido analisar as situações em que este passa pelas zonas “possíveis” e que possam ter algum efeito dentro da marina. Na Figura 39 podemos ver a direção e sentido da trajetória analisada. O início do movimento da embarcação e o seu término (ambos abruptos) dão-se dentro das zonas de esponja para minimizar as oscilações provocadas.

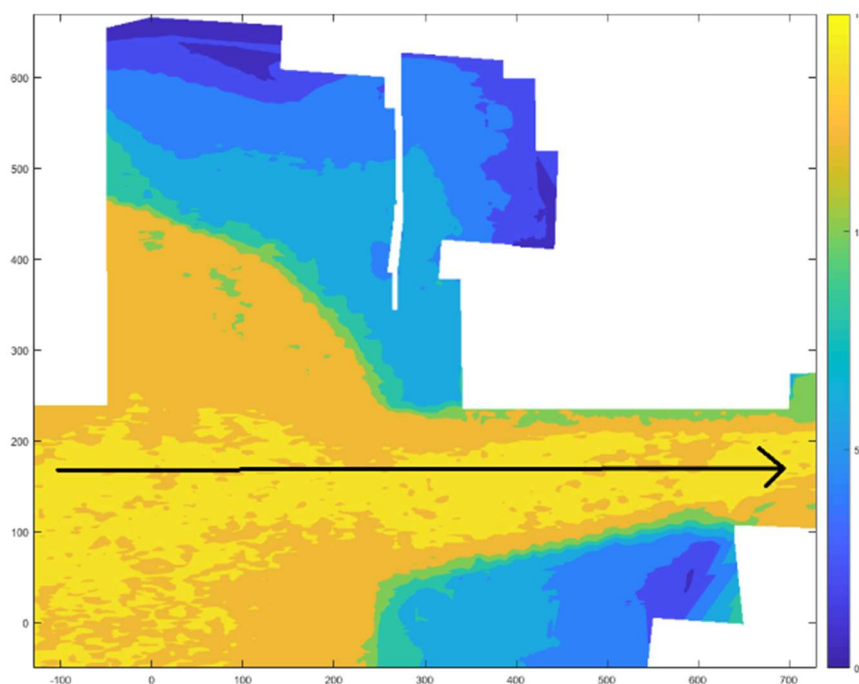


Figura 39: Sentido e direção do cargueiro.

Fazendo correr o SWASH para um tempo simulado de 7 min, correspondendo ao tempo de percurso da embarcação, mais o tempo necessário para que as ondas de esteira penetrem na marina, foram obtidos os resultados 2DH apresentados nas figuras Figura 40 a Figura 43: Posição e ondas geradas pelo cargueiro em $t=300$ s.. Atente-se na escala dos valores de elevação da superfície livre, sempre bastante baixos.

Foram também extraídos resultados para a secção de entrada da marina (ver Figura 44), que podem ser observados nas figuras Figura 45 a Figura 47.

Nas Figuras Figura 48: Visualização 3D das ondas geradas pela passagem do cargueiro em $t = 120$ s. e Figura 49: Visualização 3D das ondas geradas pela passagem do cargueiro em $t = 200$ s., é feita uma representação 3D das ondas de esteira produzidas pela embarcação, com a escala vertical ampliada por um fator de 5. Esta visualização 3D deve ser unicamente usada para ajudar a perceber mais intuitivamente o que se está a passar, não sendo um bom instrumento para uma análise quantitativa do fenómeno.

Para uma análise quantitativa, observe-se os resultados obtidos usando a visualização em 2DH e 1DH. Na visualização 2DH, é possível visualizar o padrão de propagação das ondas e, caso estas sejam suficientemente significativas, os fenómenos naturais que são suscetíveis de acontecer nesta situação,

como a difração e a reflexão. A visualização 2DH em ambiente MATLAB® permite também a obtenção de informação relativa à elevação da superfície livre em qualquer ponto do domínio. Já nos resultados 1D a informação mais importante é nos dada pela envolvente da elevação da superfície livre (Figura 46), e pelo gráfico da altura de onda máxima (Figura 47), permitindo quantificar a ordem de grandeza das oscilações existentes provocadas pelas ondas de esteira.

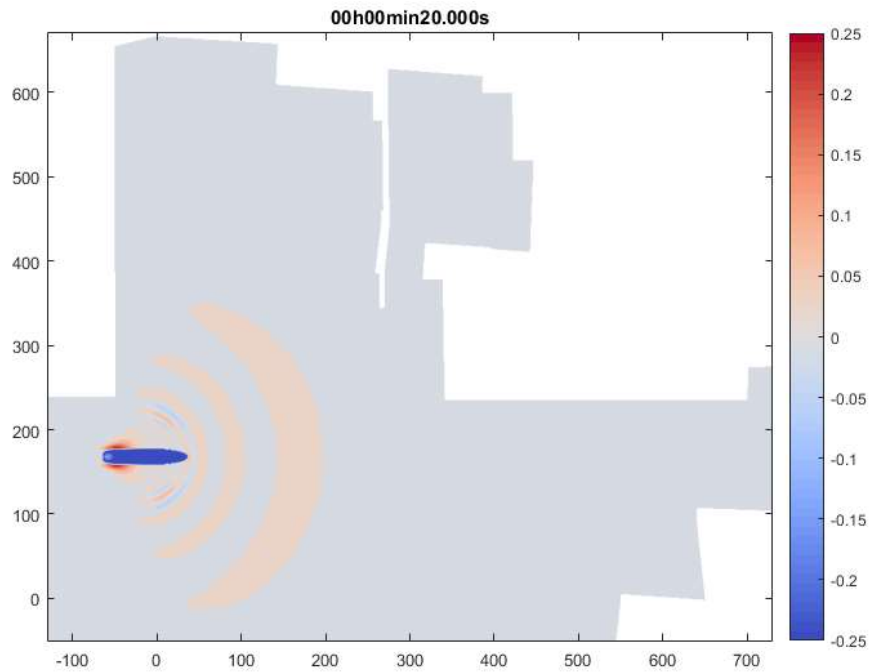


Figura 40: Posição e ondas geradas pelo cargueiro em $t = 20$ s.

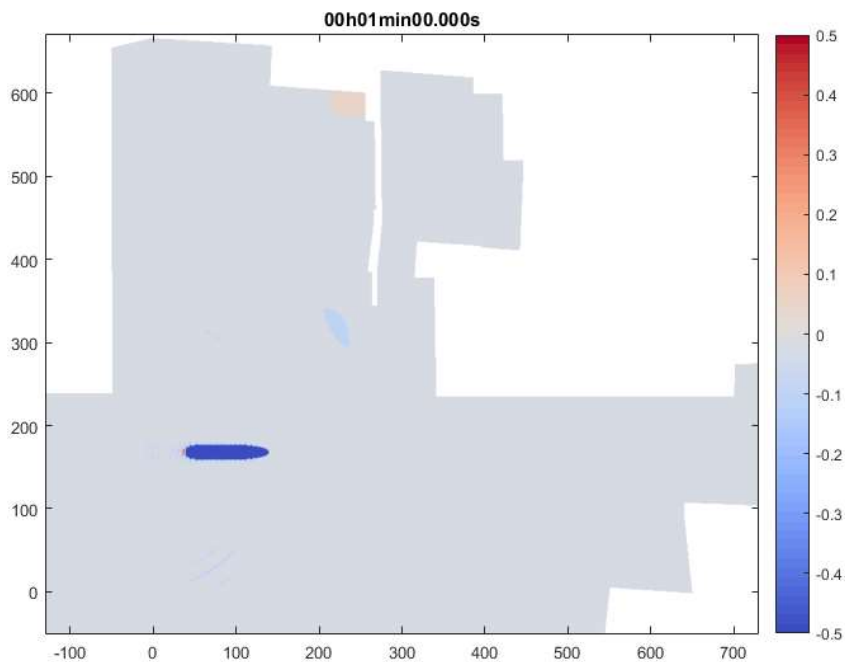


Figura 41: Posição e ondas geradas pelo cargueiro em $t = 60$ s.

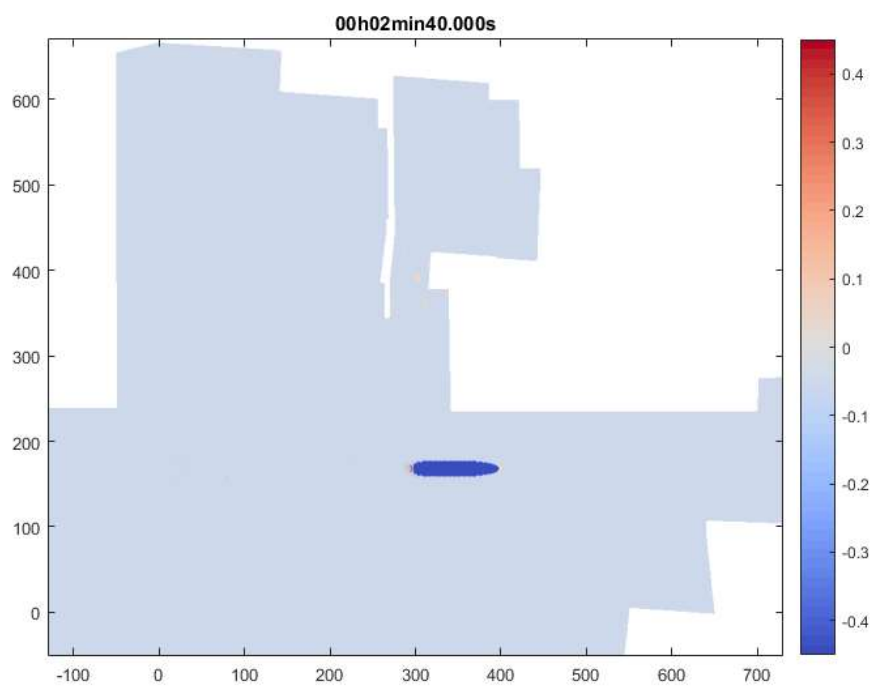


Figura 42: Posição e ondas geradas pelo cargueiro em $t = 160$ s.

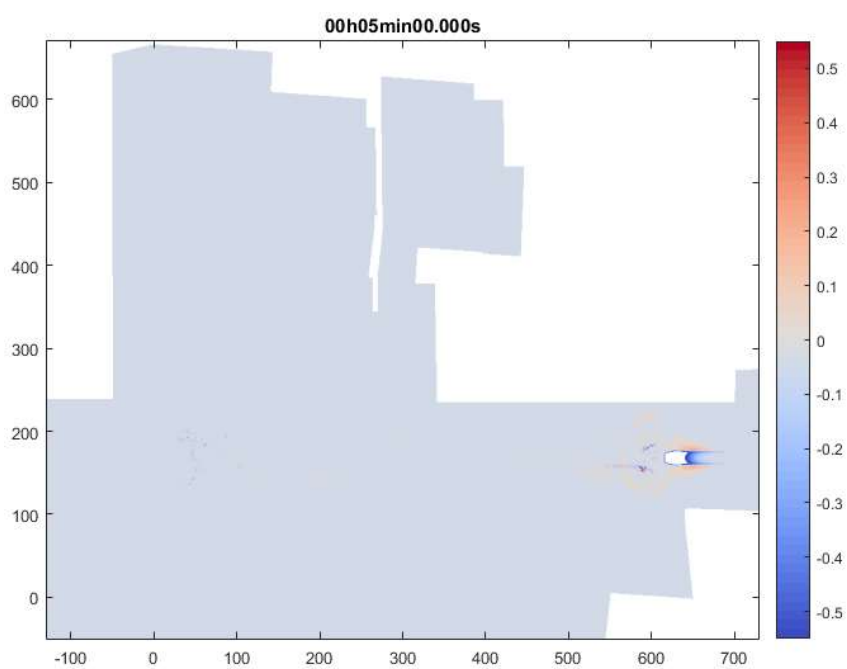


Figura 43: Posição e ondas geradas pelo cargueiro em $t = 300$ s.

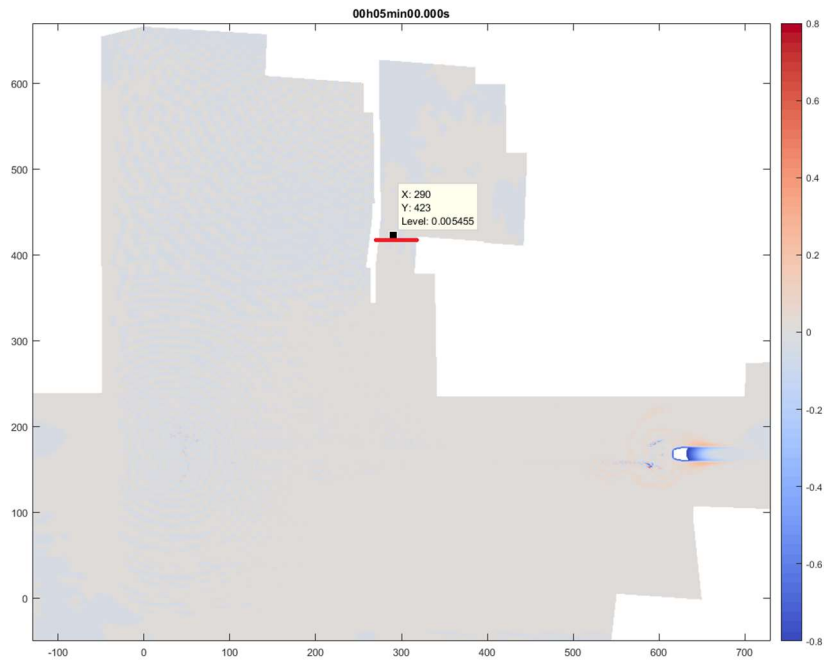


Figura 44: Linha a vermelho a secção de entrada da marina.

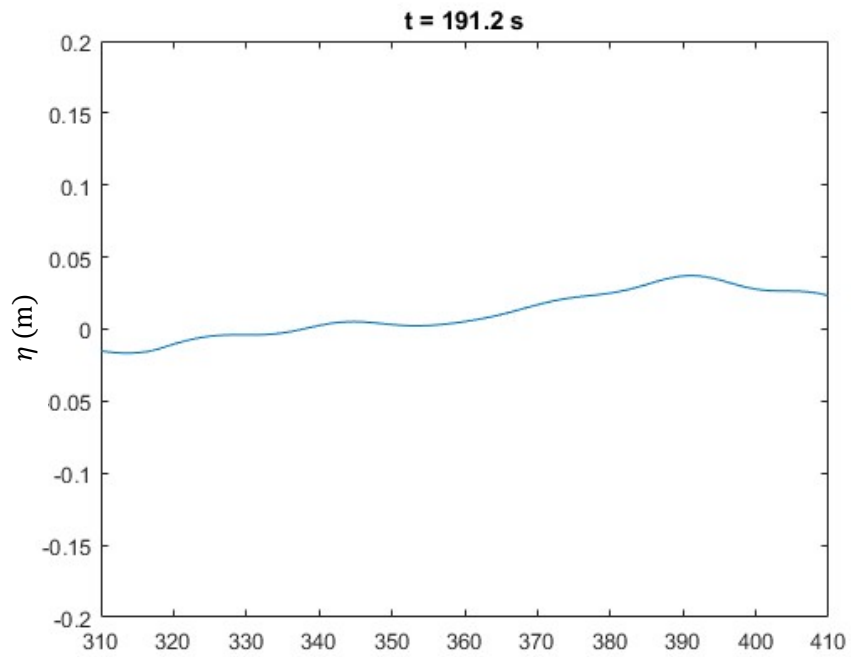


Figura 45: Elevação da superfície livre à entrada da marina para $t = 191.2 \text{ s}$.

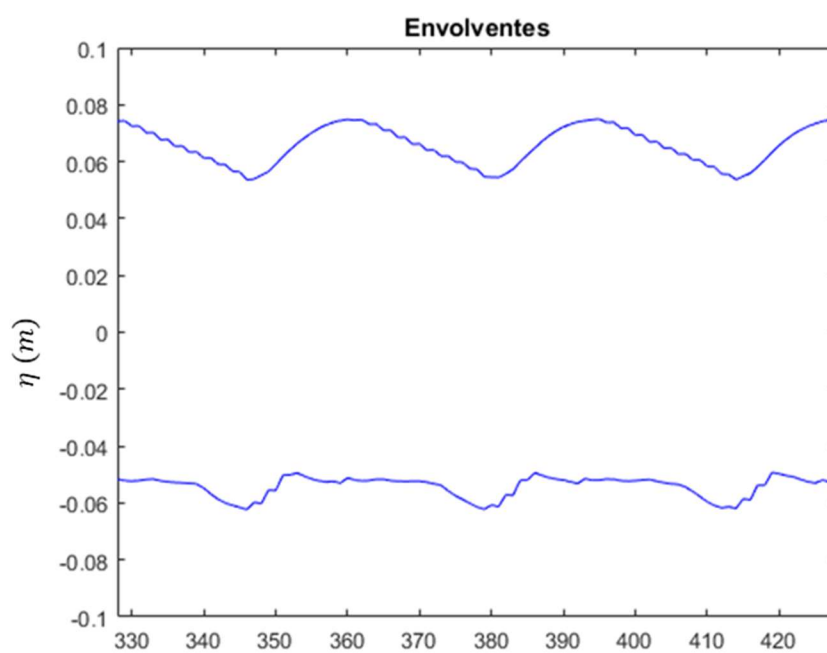


Figura 46: Envolventes da elevação da superfície livre à entrada da marina.

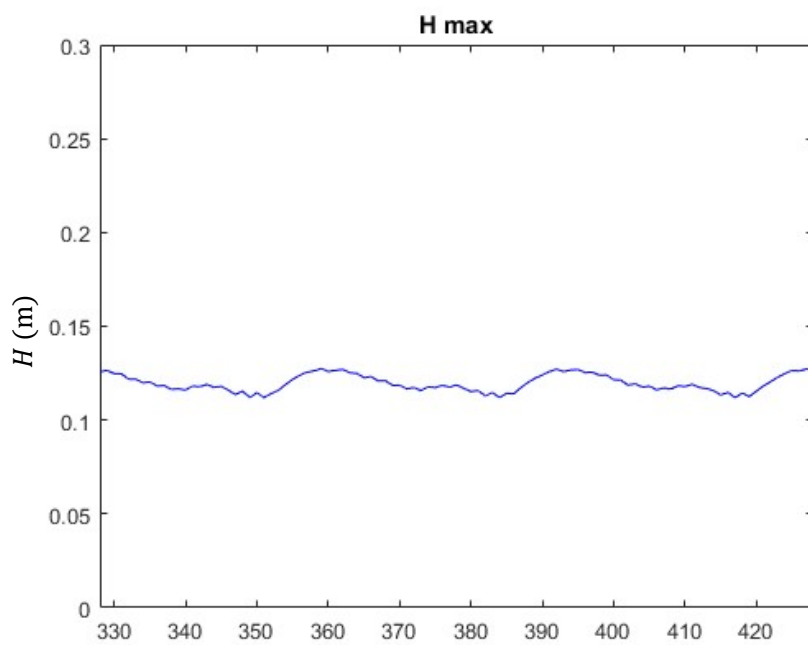


Figura 47: Altura de onda máxima à entrada da marina.

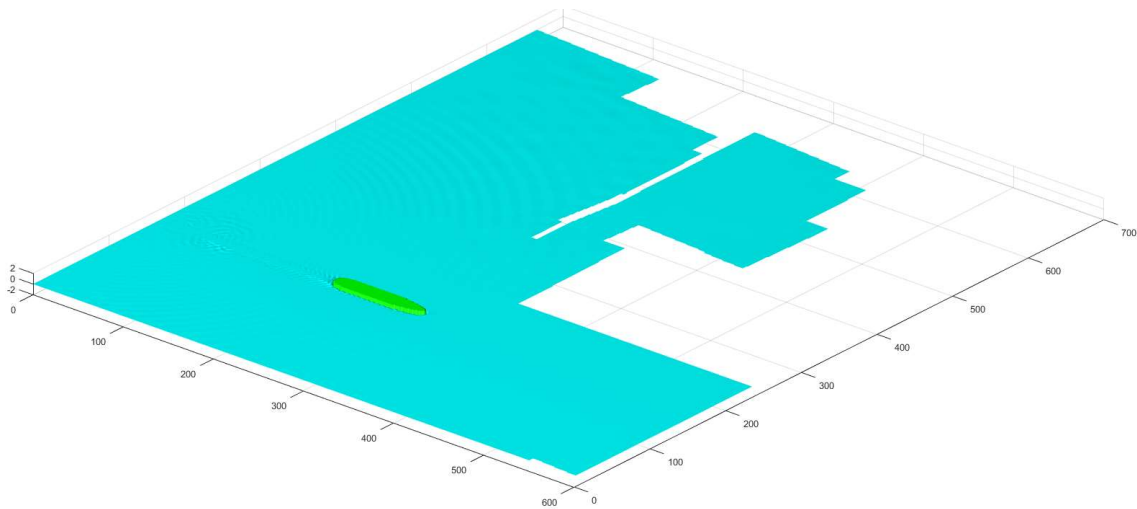


Figura 48: Visualização 3D das ondas geradas pela passagem do cargueiro em $t = 120$ s.

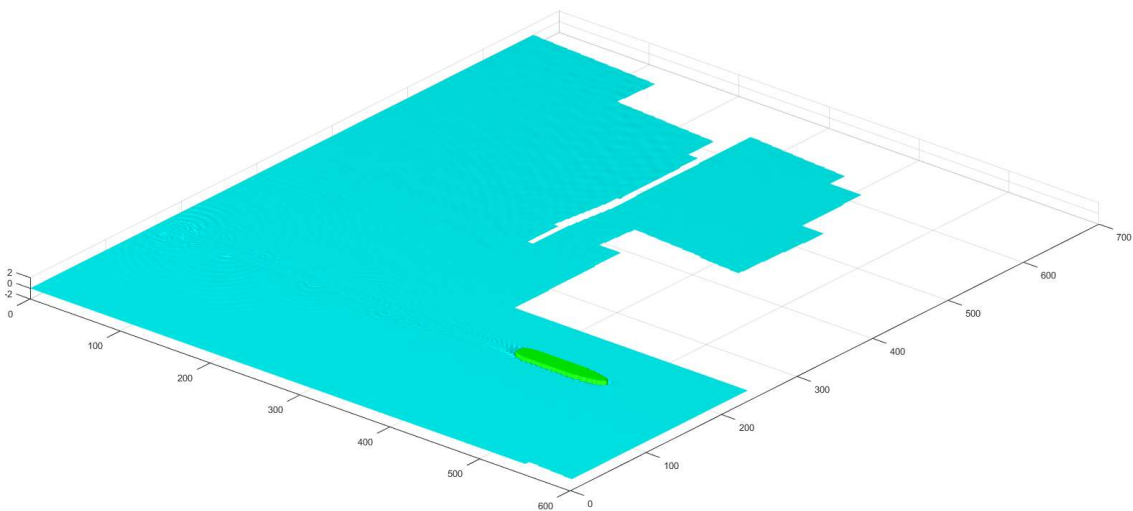


Figura 49: Visualização 3D das ondas geradas pela passagem do cargueiro em $t = 200$ s.

Como se pode ver na Figura 47, a altura de ondas gerada pela passagem da embarcação é de facto muito pequena, tendo uma altura máxima de cerca de 14 cm à entrada da marina. Intuitivamente, este não parece o resultado mais óbvio, tendo em conta a massa de água deslocada por uma embarcação tão grande. No entanto, tal como referido anteriormente é a velocidade a que a embarcação se desloca a variável com maior influência na altura das ondas de esteira. Recordando o método de Kriebel e Seelig (21),

$$H_{\text{máx}} = \frac{u^2}{g} \beta (\text{Fr}_* - 0.1)^2 \quad (53)$$

a qual permite estimar a altura de onda num ponto que a uma distância do eixo da trajetória igual ao comprimento do barco, e sabendo que apenas β considera o volume de água deslocado, verifica-se que $H_{\text{máx}}$ varia linearmente com β , enquanto varia quadraticamente com os termos relativos à velocidade, u e Fr_* .

Foram também obtidos resultados para a mesma embarcação a deslocar-se em sentido contrário, sobre a mesma trajetória e com a mesma velocidade. Analogamente a este caso, a elevação da superfície livre é muito baixa, pelo que se dispensa a apresentação de resultados, semelhantes aos obtidos neste caso.

5.2. EMBARCAÇÃO TIPO REBOCADOR

A embarcação do tipo Rebocador, de dimensões mais reduzidas do que um cargueiro, mas maiores do que a Lancha de Pilotos, é baseada num rebocador Pella 16609 (ver Figura 50), construído pelos estaleiros Pella Shipyard de São Petersburgo, Rússia. Esta embarcação tem um deslocamento de 500 t, a que corresponde um calado de 3.79 m, com um comprimento de 28 m e uma largura de 10 m.



Figura 50: Rebocador Pella 16609 (© "PELLA" 2004–2018).

Para analisar o efeito das ondas de esteira geradas por este tipo de embarcação, foram seleccionados três percursos, dois com a mesma direção, mas sentidos opostos, semelhantes ao percurso do cargueiro, mas mais próximo do limite norte do canal, por forma a tornar os efeitos das ondas geradas no interior da marina mais gravesos (ver Figura 51), e um terceiro percurso onde a embarcação se desloca desde o

canal interior do porto e atraca junto ao molhe a oeste da marina, local onde é costume atracarem os embarcações de patrulha costeira da Marinha (ver Figura 52).

Nos três casos, as malhas com os campos de pressão foram construídas com uma definição $\Delta x = \Delta y = 1$ m. Para os dois primeiros casos, trajetórias retilíneas, foi definida uma malha de dimensões de 860 m \times 40 m, ancorada no ponto $(x_0, y_0) \equiv (-130, 180)$ m. No caso da trajetória curvilínea, a malha tem dimensões de 500 m \times 400 m, ancorada no ponto $(x_0, y_0) \equiv (200, 100)$ m.

5.2.1. DIREÇÃO HORIZONTAL, SENTIDO PARA O INTERIOR DO PORTO

Foi considerada uma velocidade $u = 12.4$ kn, i.e. $u = 6.4$ m/s próxima da velocidade máxima desta embarcação. A duração total da simulação foi de 3 min, permitindo que as ondas geradas pelo rebocador se propagassem para o interior da marina. O início e o término do movimento do rebocador (ambos abruptos) dão dentro das zonas de esponja, para diminuir as oscilações causadas. Verificou-se, no entanto, ser impossível eliminar totalmente as oscilações provocadas no início do movimento, e que permanecem, embora localizadas no espaço, ao longo de toda a simulação, como se pode observar na Figura 56, para $t = 153$ s, na região $0 \leq x \leq 200$ e $150 \leq y \leq 250$. Estas perturbações parecem ter celeridade nula ou muito reduzida, não se propagando para o resto do domínio computacional.

Neste caso, há uma onda de esteira de amplitude considerável e padrão bem definido (ver Figuras Figura 53 a Figura 56), gerada pelo deslocamento do rebocador. De facto, recorrendo ao método de Kriebel e Seelig (21), com $u = 6.4$ m/s, $\nabla = 489$ m³, $B = 10$ m, $L = 28$ m, $D = 3.79$ m e $L_E = 8$ m, obtém-se os valores de $\beta = 2.63$ e $Fr_* = 0.492$, de onde resultam $H_{\text{máx}} = 1.69$ m. Esta é uma altura de onda bastante significativa, tendo em conta o problema que se propõe a estudar este trabalho. Enquanto que para dimensionamento de quebra-mares, por exemplo, esta não é uma altura de onda que se possa considerar problemática, no interior de uma marina uma onda desta altura provoca uma grande oscilação nas embarcações aí atracadas, e pode provocar danos nas infraestruturas aí existentes, por exemplo nas plataformas flutuantes.

No entanto, analisando as Figuras Figura 53 a Figura 56, percebe-se que a ondulação provocada pelo rebocador praticamente não penetra na marina, ficando confinada ao seu canal de entrada, onde sofre diversos fenómenos de difração e reflexão, dissipando grande parte da sua energia. Nas Figuras Figura 59 e Figura 60 pode-se comparar a altura máxima das ondas numa secção à entrada da marina, onde a altura de onda máxima atinge os 1.6 m, e noutra secção no seu interior, onde a altura de onda máxima registada é de cerca de 0.20 m (ver Figura 58 para identificação das secções em causa). Confirma-se assim que a extensão do molhe oeste da marina, construída especificamente para evitar a propagação de ondas de esteira para o interior desta, funciona como pretendido no caso de um rebocador navegando à sua velocidade máxima, numa rota paralela à entrada da marina. Neste caso verificou-se que a altura máxima da ondulação no interior da marina foi limitada a cerca de 20 cm.

Para uma percepção mais intuitiva do padrão de propagação das ondas de esteira neste caso, e como as ondulação tem a sua penetração bloqueada para o interior da marina, foram produzidas visualizações 3D (com a escala vertical ampliada de um fator de 5) do campo de ondas para três instantes distintos (ver Figuras Figura 61 a Figura 63). Repare-se que para um intervalo de tempo de 23 s, entre as os instantes $t = 60$ s (cf. Figura 62) e $t = 83$ s (cf. Figura 63) a agitação mantém-se confinada na entrada da marina e, dentro desta, as águas permanecem calmas.

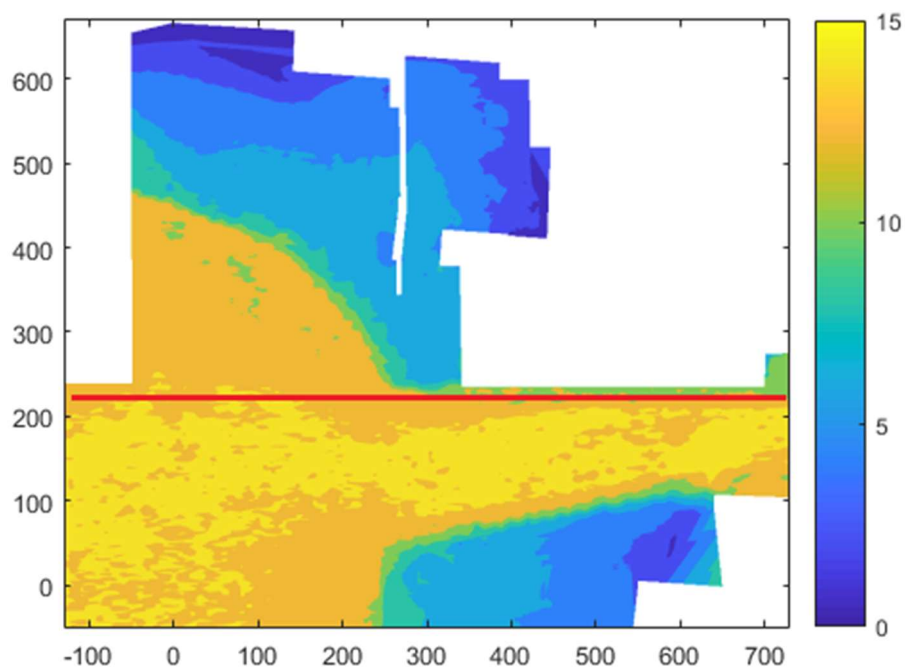


Figura 51: Percurso retilíneo do rebocador.

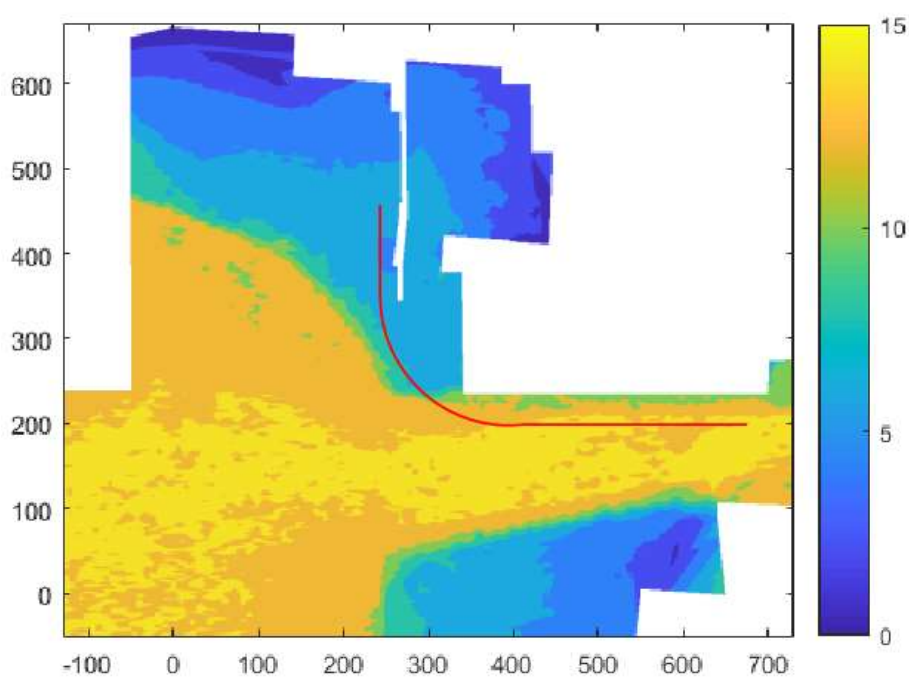


Figura 52: Percurso curvo do rebocador.

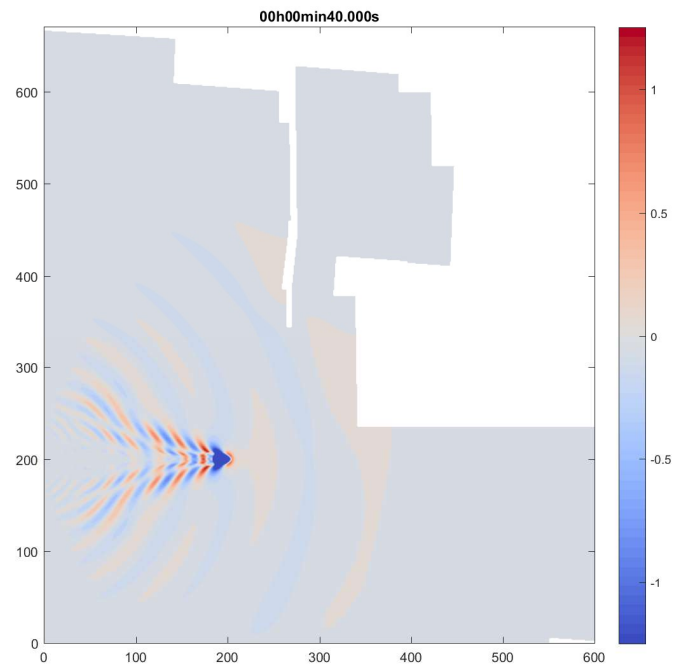


Figura 53: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 40$ s.

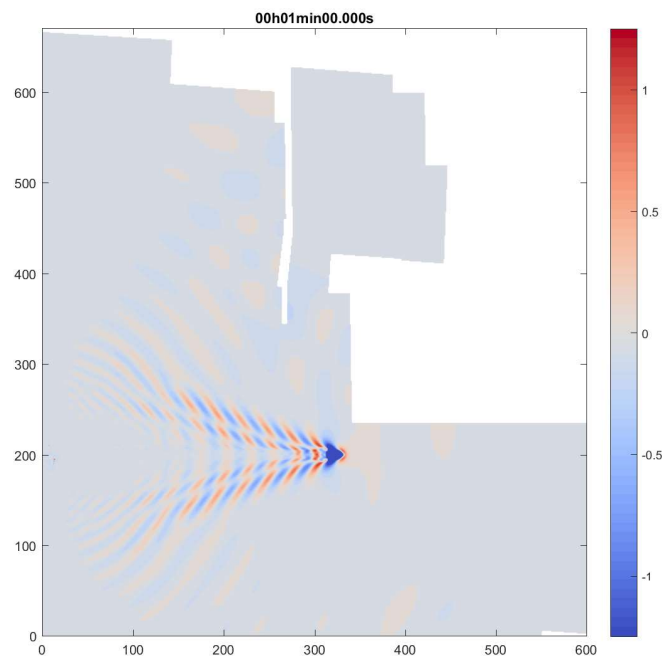


Figura 54: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 60$ s.

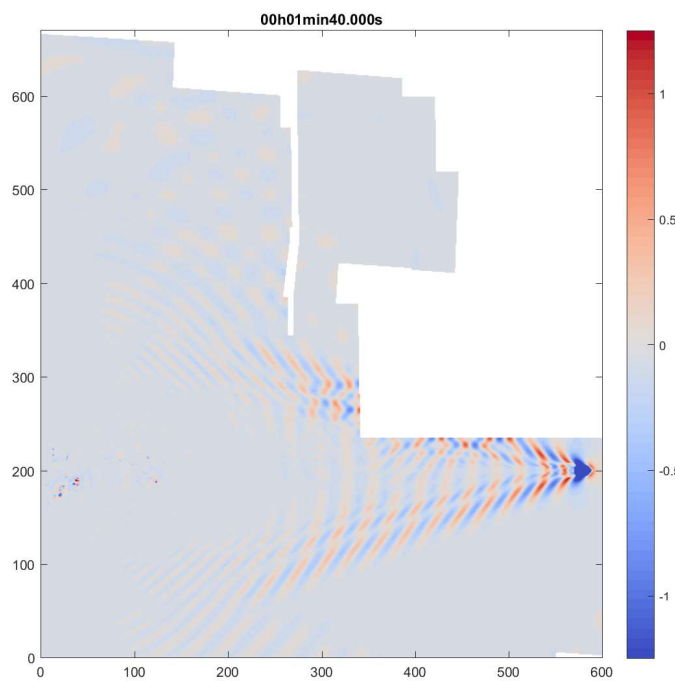


Figura 55: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 100$ s.

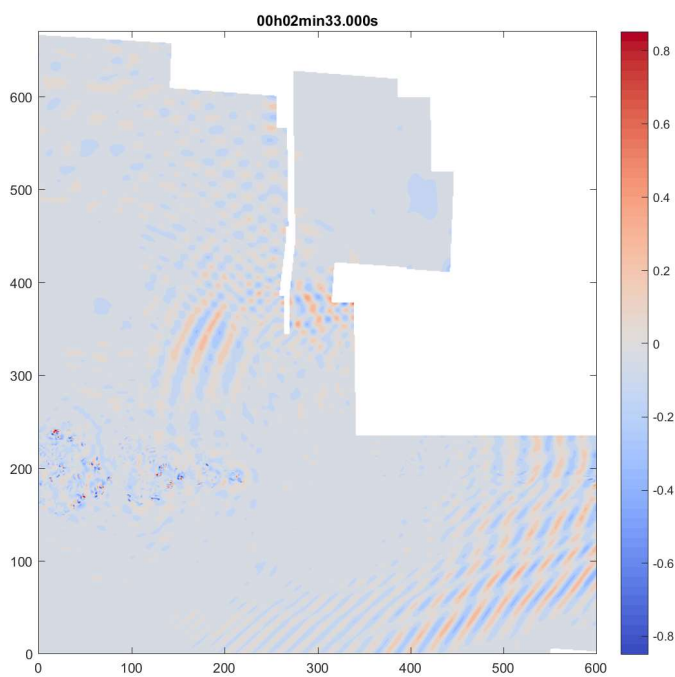


Figura 56: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 153$ s.

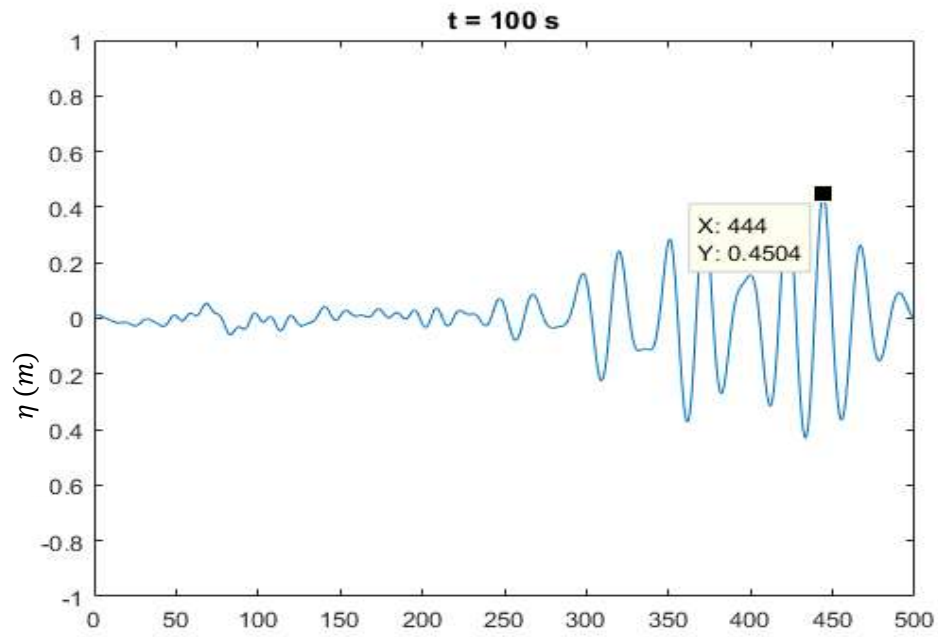


Figura 57: Elevação da superfície livre sobre a trajetória do rebocador em $t = 100$ s.

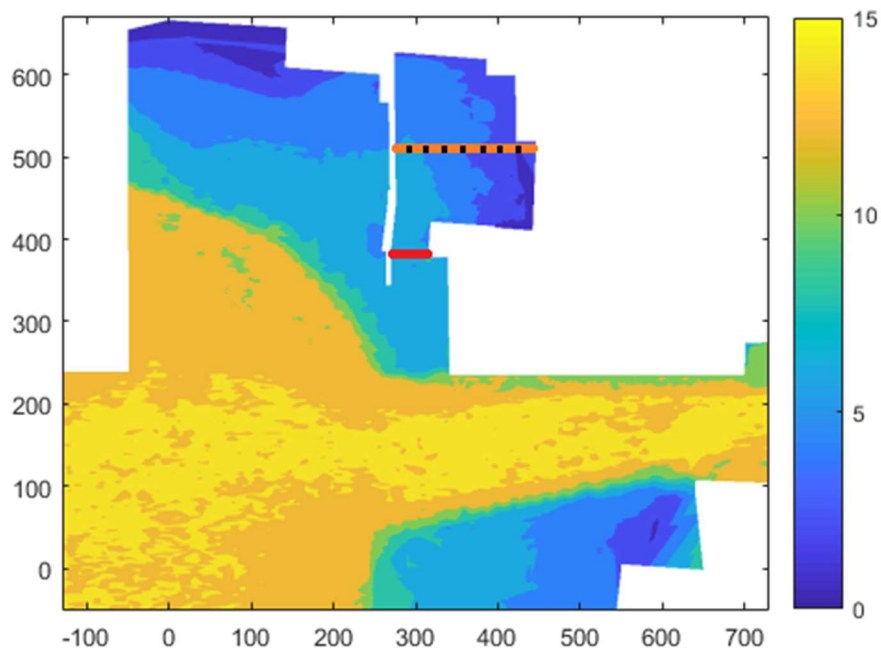


Figura 58: Secções à entrada da marina (—) e no interior da marina (---).

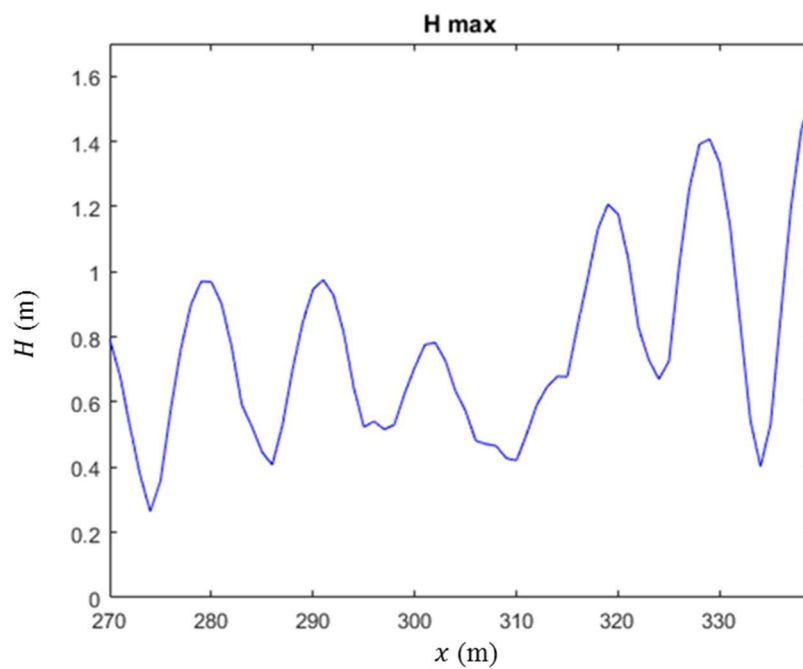


Figura 59: Altura máxima das ondas provocadas pelo rebocador na secção de entrada da marina.

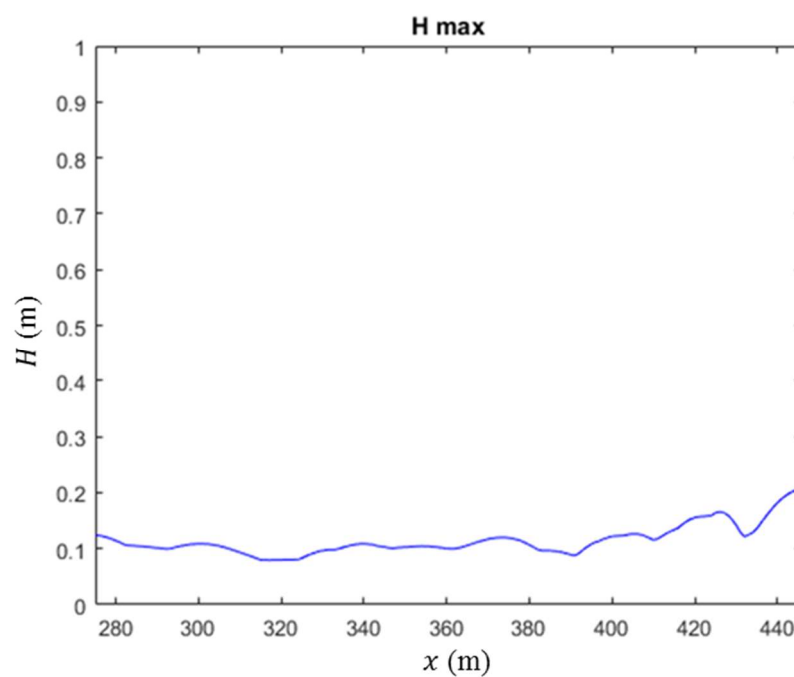


Figura 60: Altura máxima das ondas provocadas pelo rebocador na secção no interior da marina.

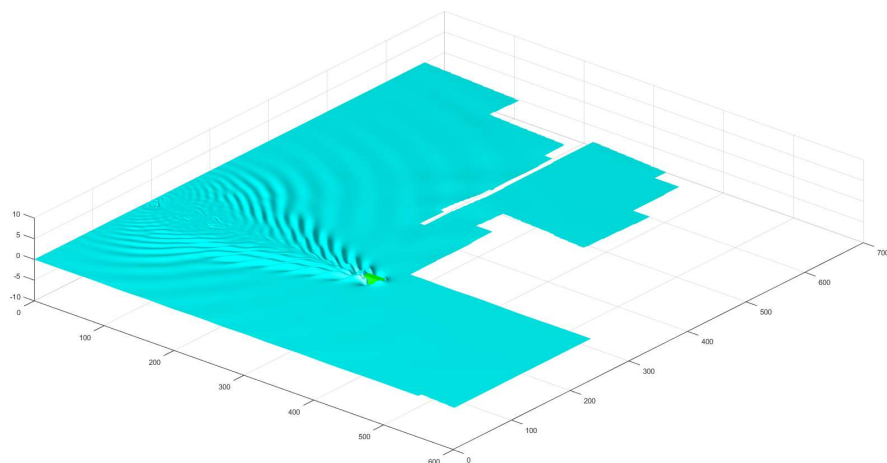


Figura 61: Ondas de esteira geradas pelo rebocador para $t = 60$ s.

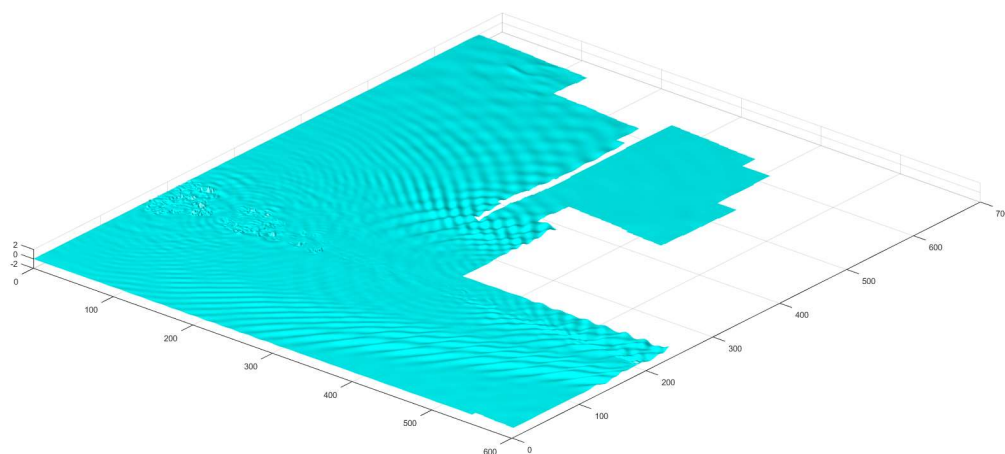


Figura 62: Ondas de esteira geradas pelo rebocador para $t = 130$ s.

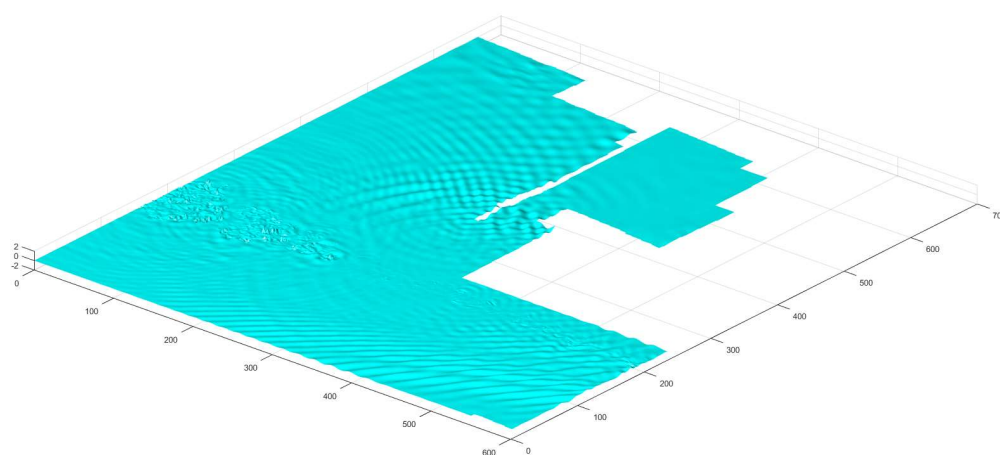


Figura 63: Ondas de esteira geradas pelo rebocador para $t = 153$ s.

5.2.2. DIREÇÃO HORIZONTAL, SENTIDO PARA O EXTERIOR DO PORTO

Foi considerada uma velocidade $u = 12.4$ kn, i.e. $u = 6.4$ m/s próxima da velocidade máxima desta embarcação. A duração total da simulação foi de 3 min, permitindo que as ondas geradas pelo rebocador se propagassem para o interior da marina. O início e o término do movimento do rebocador (ambos abruptos) dão dentro das zonas de esponja, para diminuir as oscilações causadas. Neste caso, porém, não se verificou a existência de oscilações espúrias nem na região próxima ao início do movimento, nem na região próxima ao seu fim. O sentido do movimento do interior do porto para o seu exterior, vai fazer com que as ondas de esteira tenham um comportamento diferente do caso anterior (movimento para o interior do porto), dada a complexidade dos padrões de reflexão das ondas nas paredes dos molhes limítrofes.

Nas Figuras 65 a 67 são representados os campos de agitação produzidos pelo rebocador em três instantes distintos. Da sua observação, pode imediatamente concluir-se que a agitação sentida tanto no interior como na proximidade da marina é bastante inferior neste caso, quando comparado com o caso em o rebocador se desloca com sentido oposto. À partida a razão para isto acontecer parecer ter duas causas.

A primeira deve-se à existência de um molhe paralelo à trajetória e a estibordo da embarcação. Como se pode perceber na Figura 64, a quase a totalidade da energia das ondas de esteira produzida antes de a embarcação passar em frente à entrada da marina, é agora refletida na parede do molhe, propagando-se para sul.

A segunda tem a ver com a outra parede do mesmo molhe que é perpendicular à trajetória. Neste caso, as ondas já não sofrem reflexão nesta parede, como se pode compreender da análise das Figuras 65 e 66, o que, no caso do movimento para o interior do porto, originava uma concentração de energia à entrada da marina. De facto, no caso agora em análise a única ondulação que agora atinge a entrada da marina, parece fazê-lo por um efeito de difração no vértice das duas paredes atrás referidas.

Para confirmar que de facto a ondulação existente nesta situação é inferior em amplitude ao caso anterior, mostra-se, nas Figuras 68 e 69 a altura máxima de onda que, durante a simulação, ocorreu em nas secções transversais da marina identificadas na Figura 58. É interessante verificar que, apesar da diferença que existe nos padrões da agitação à entrada da marina, a altura máxima da ondulação é praticamente a mesma nos dois casos analisados, o que mais uma vez atesta a eficácia das estruturas existentes para o bloqueio da entrada na marina da ondulação gerada por embarcações que se deslocam paralelamente à entrada daquela.

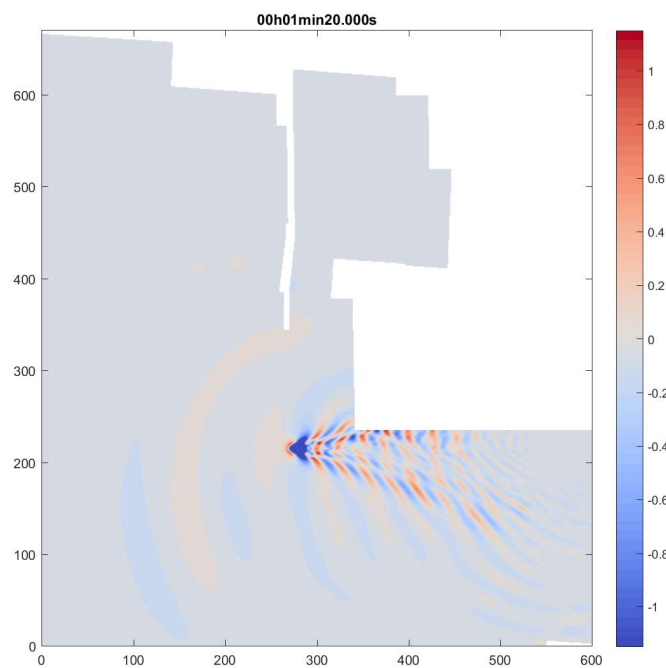


Figura 64: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 80$ s.

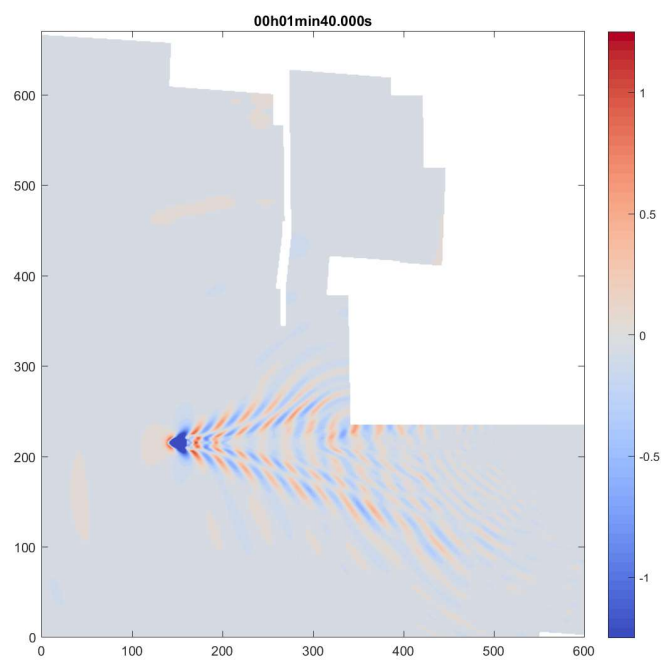


Figura 65: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 100$ s.

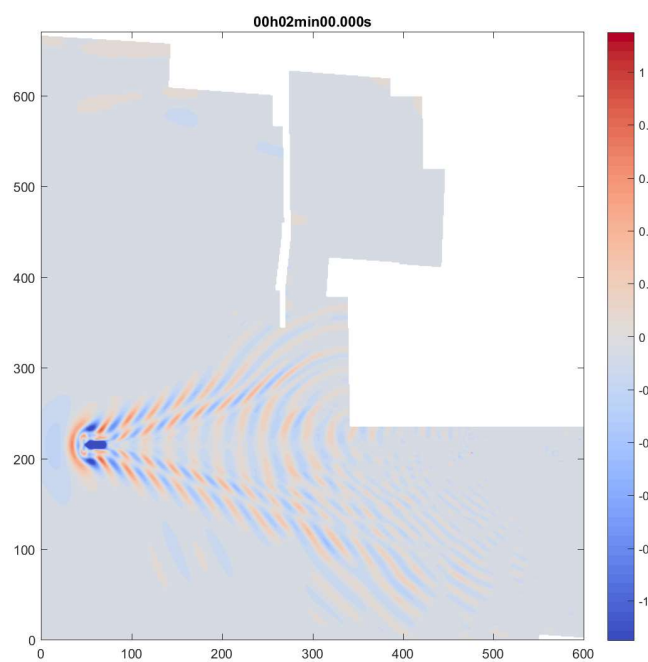


Figura 66: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 120$ s.

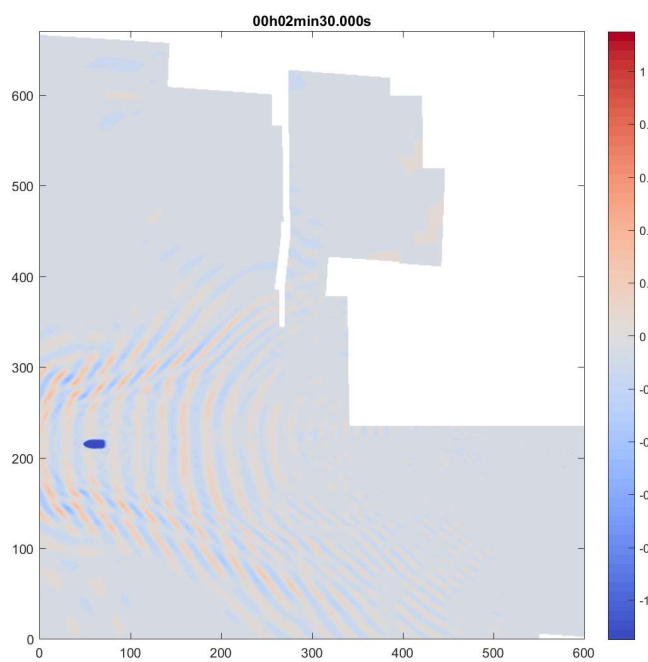


Figura 67: Posição e ondas geradas pelo rebocador em $t = 150$ s.

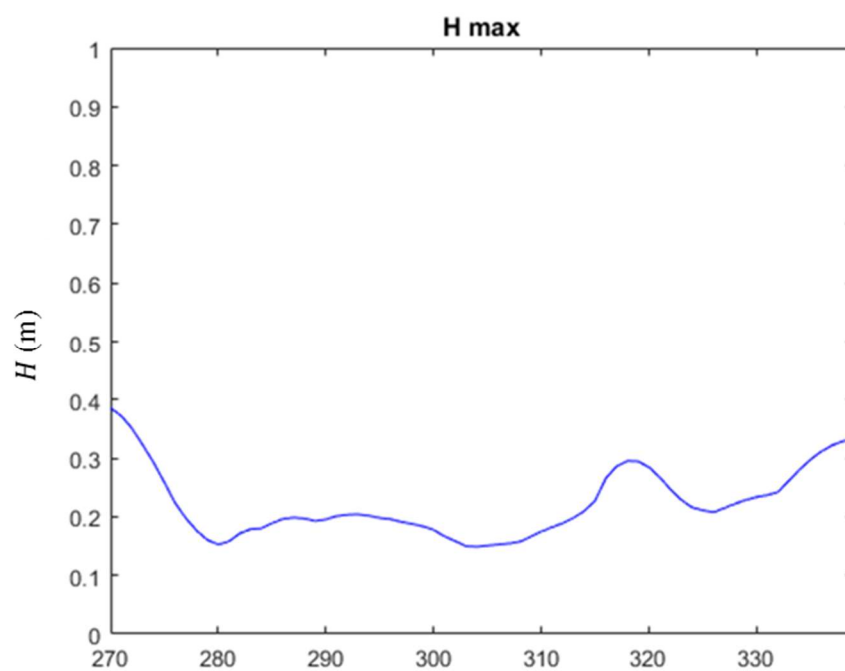


Figura 68: Altura máxima das ondas provocadas pelo rebocador à entrada da marina.

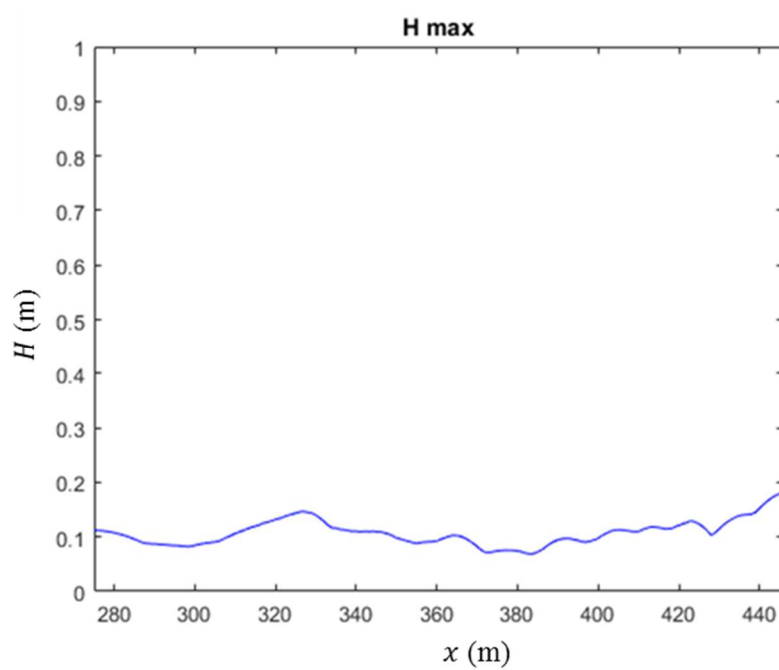


Figura 69: Altura máxima das ondas provocadas pelo rebocador numa seção no interior da marina.

5.2.2. MANOBRA DE ACOSTAGEM

O objetivo deste caso é analisar o efeito das ondas de esteira geradas numa trajetória de aproximação e acostagem ao paramento exterior do molhe oeste marina. Neste caso a distância entre a trajetória da embarcação e a entrada da marina é relativamente pequena.

Neste caso, o trajeto é composto por três segmentos:

- no primeiro segmento, o rebocador percorre uma trajetória retilínea ($y \equiv 175$ m) com uma extensão de 185 m, iniciada ainda dentro da zona de esponja. A velocidade do rebocador cresce linearmente com a distância percorrida, desde uma velocidade quase nula até a uma velocidade final de 12.4 kn, i.e. 6.4 m/s;
- no segundo segmento, o rebocador percorre uma trajetória circular com um raio de 250 m, descrevendo um quarto de círculo a uma velocidade constante de 12.4 kn;
- no terceiro segmento, o rebocador descreve uma trajetória retilínea ($x \equiv 230$ m) com uma extensão de 50 m. A velocidade do rebocador diminui linearmente com a distância percorrida, desde uma velocidade de 12.4 kn no início do segmento até a uma velocidade quase nula no instante em que termina o seu movimento.

Nas Figuras Figura 70 a Figura 73 estão representados os campos de agitação gerados pelo rebocador na sua manobra de aproximação e acostagem. A análise destes campos permite concluir que esta trajetória do rebocador induz um nível de agitação, no interior da marina, mais elevado do que os dois casos anteriores. No entanto, o nível de agitação no canal de acesso à marina parece ser, neste caso, menor do que no caso 5.2.1 e maior do que no caso 5.2.2.

A explicação para tal facto, poderá passar novamente pelo ângulo de incidência da agitação. Assim, no primeiro segmento do movimento, aquele ângulo é semelhante ao do caso 5.2.2, e por isso muito menos gravoso, quer para a entrada quer para o interior da marina. Posteriormente, conforme a trajetória vai rodando, tornando-se perpendicular à entrada, o ângulo de incidência das ondas de esteira vai também rodando, até que estas se propagam para o interior da marina, praticamente não encontrando quaisquer obstáculos. Desta forma, e por não se verificarem os mesmos fenómenos de reflexão que no caso 5.2.1 bloqueavam a entrada da onda de esteira na marina, esta propaga-se agora com maior facilidade para o seu interior.

Para além disso, ocorre agora um outro fenómeno. A formação das ondas de esteira durante o movimento circular assume um padrão assimétrico. Assim, as ondas geradas no lado exterior da trajetória, a bombordo da embarcação, parecem ter uma amplitude ligeiramente superior às ondas geradas do lado interior da trajetória, a estibordo da embarcação (ver Figura 71).

A análise da altura de onda máxima ao longo de vários transeptos (ver Figura 74), parece dar força às hipóteses sugeridas. Assim, ao longo do transepto preto, a amplitude das ondas de esteira é ligeiramente maior do lado externo da trajetória, i.e. para $x < 230$ m, do que do lado interno (ver Figura 75). A análise da Figura 76 permite-nos concluir que, de facto, a altura de onda máxima à entrada da marina, $H \approx 1.0$ m, é menor do que no primeiro caso ($H \approx 1.5$ m, cf. Figura 59), mas maior do que no segundo caso ($H \approx 0.4$ m, cf. Figura 68). Quanto à altura de onda no interior da marina, ao longo do transepto amarelo (ver Figura 77), ela varia entre 0.2 m e 0.4 m no caso da manobra de atracagem do rebocador, i.e. cerca do dobro do registado nos outros dois casos, em que variava entre 0.1 m e 0.2 m (cf. Figuras Figura 60 e Figura 69). A análise da Figura 78, altura máxima de onda ao longo do transepto vermelho, paralelo ao eixo OY , confirma que as ondas de esteira têm uma amplitude maior no exterior da marina do que no seu interior.

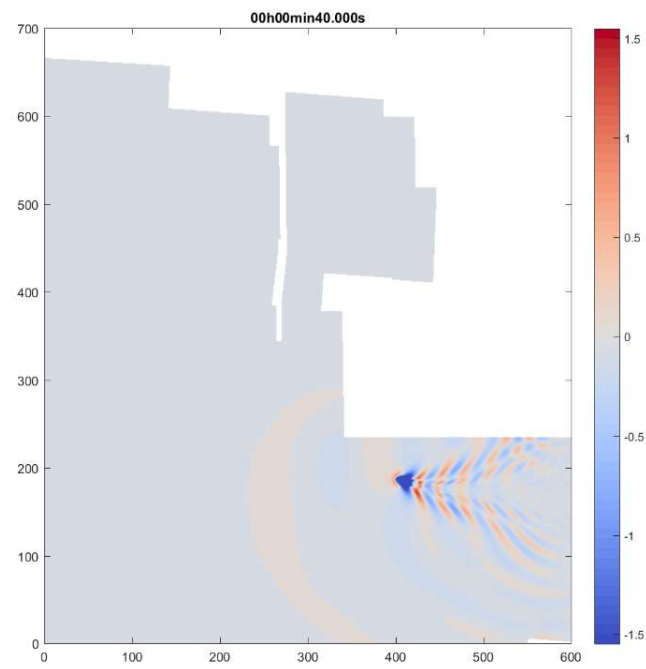


Figura 70: Posição do rebocador e ondulação em $t = 40$ s.

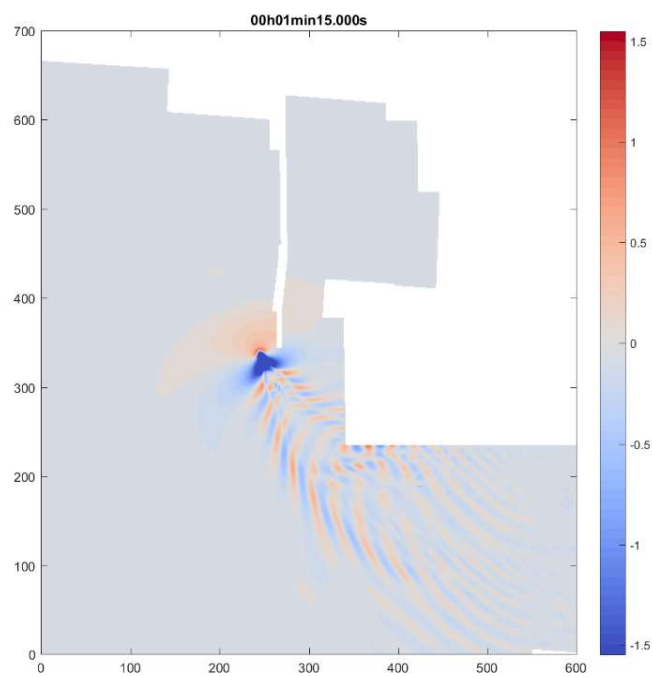


Figura 71: Posição do rebocador e ondulação em $t = 75$ s.

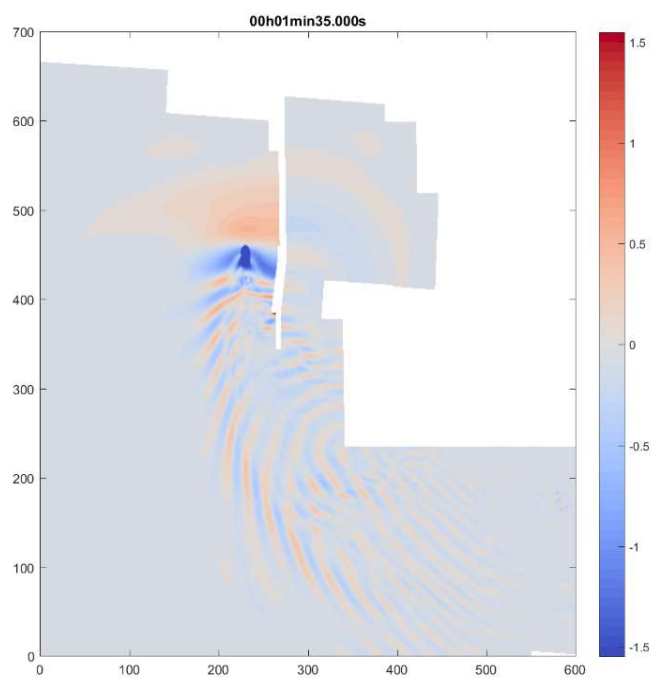


Figura 72: Posição do rebocador e ondulação em $t = 95$ s.

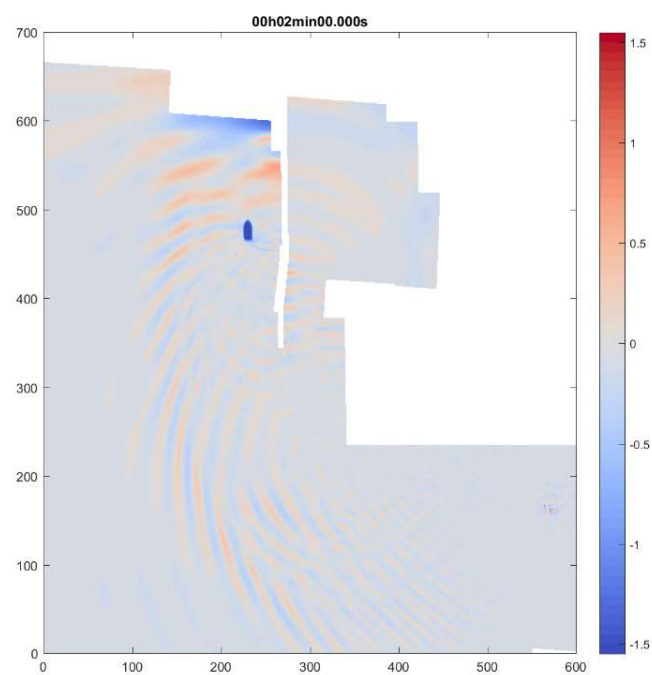


Figura 73: Posição do rebocador e ondulação em $t = 120$ s.

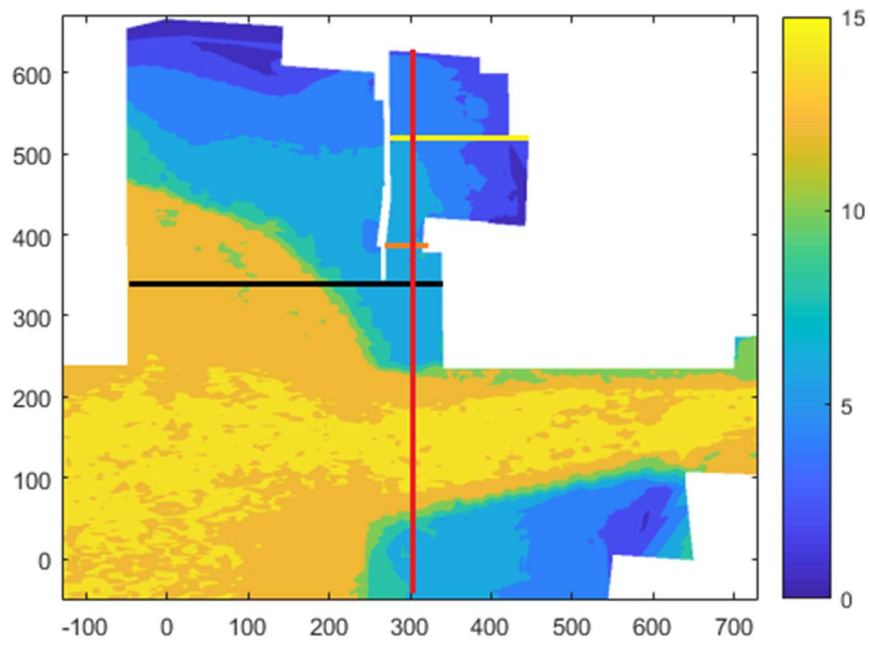


Figura 74: Transeptos para análise da altura de onda máxima.

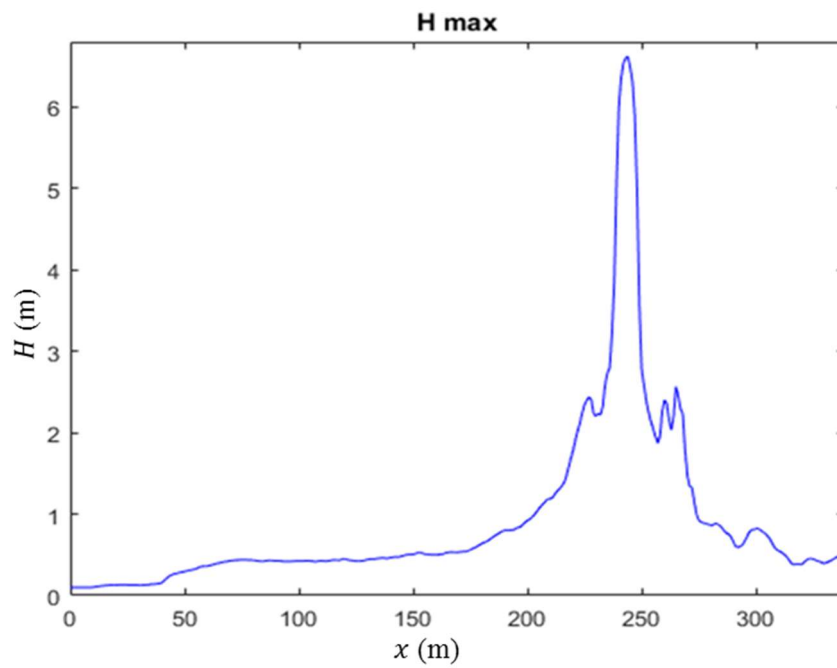


Figura 75: Altura máxima da ondulação ao longo do transepto de cor preta (—).

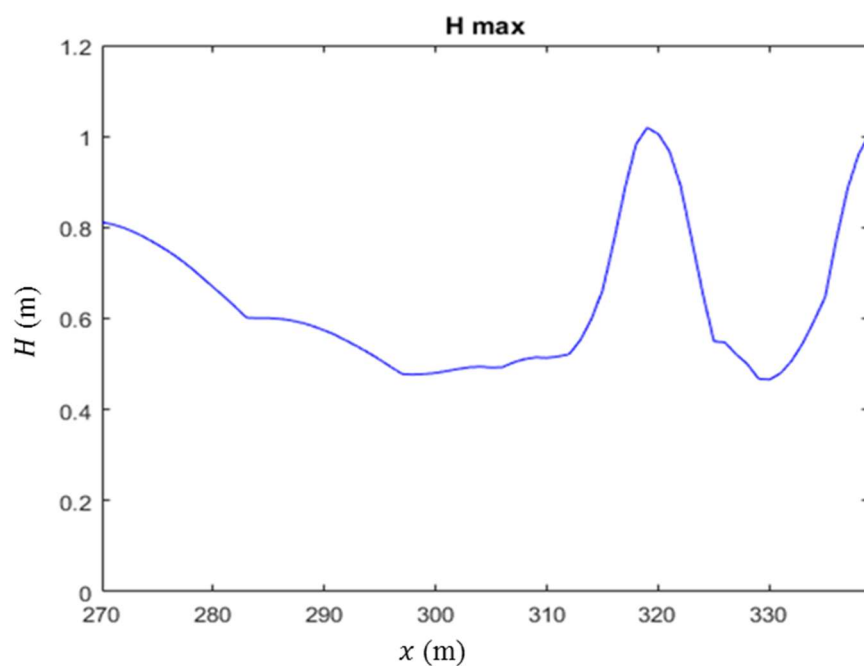


Figura 76: Altura máxima da ondulação à entrada da marina, ao longo do transepto cor laranja (—).

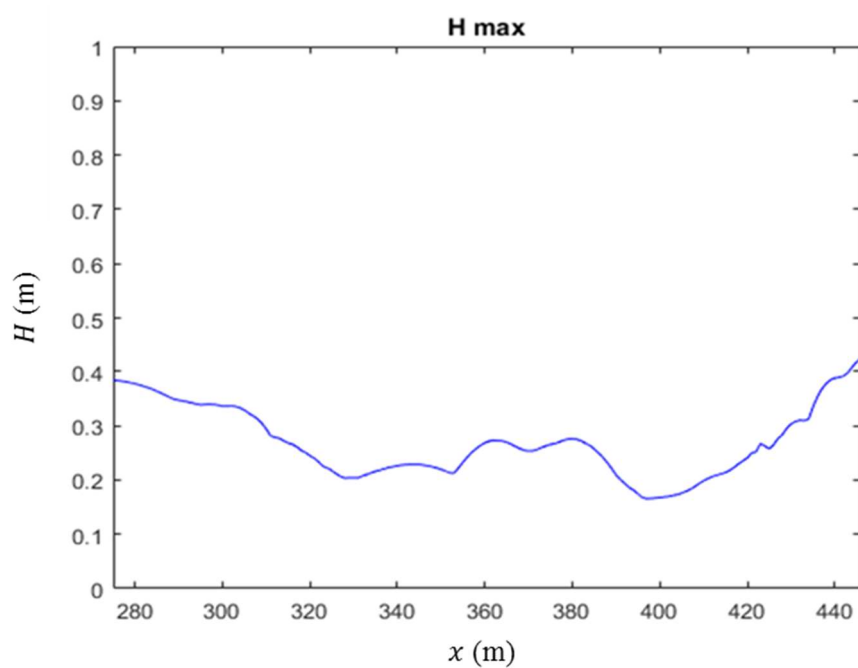


Figura 77: Altura máxima da ondulação no interior da marina, ao longo do transepto de cor amarela (—).

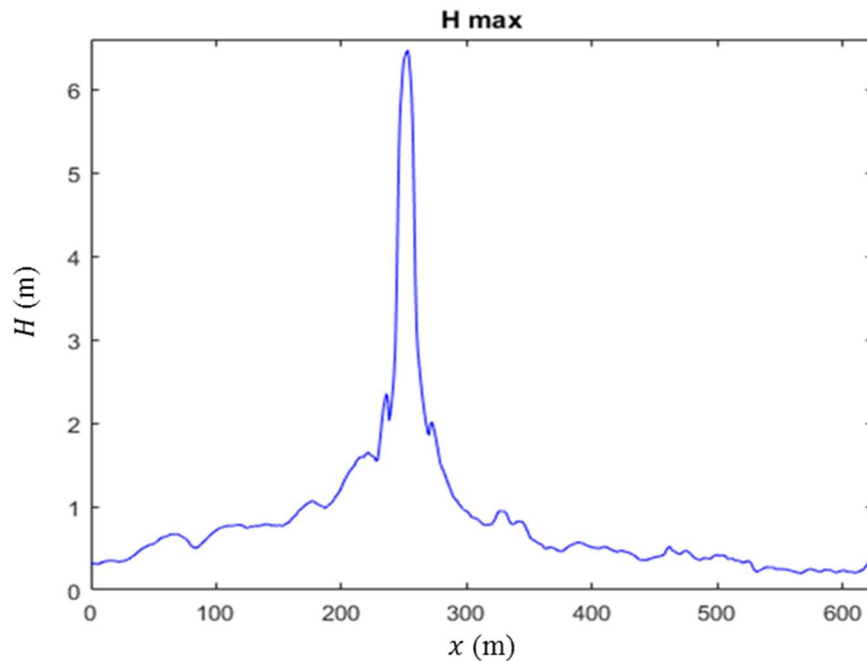


Figura 78: Altura máxima da ondulação ao longo do transepto de cor vermelha (—).

5.3. EMBARCAÇÃO TIPO LANCHAS DE PILOTOS

O terceiro tipo de embarcação estudado é do tipo Lancha de Pilotos. É uma embarcação baseada na lancha 17M Pilot Boat (ver Figura 79), construída pela Besiktas Workboats, Turquia. Esta lancha tem um deslocamento de 40 t, a que corresponde um calado de 0.99 m, com um comprimento de 16 m e uma largura de 6 m. Com um volume deslocado de apenas 39 m³, esta é a embarcação mais pequena das três que compõem este estudo.



Figura 79: Embarcação 17M Pilot Boat, embarcação tipo lancha de pilotos (© Besiktas Workboats).

Fazendo uma estimativa da altura de onda máxima recorrendo ao método de Bhowmik (23), cuja aplicabilidade se restringe a embarcações de pequenas dimensões, com os parâmetros acima definidos e para $y = 16$ m, que é aproximadamente a distância da lancha às paredes da entrada da marina, pode-se reescrever a equação atrás enunciada, fazendo-a depender apenas da velocidade u . Assim, ter-se-á:

$$H(u) = (0.139 u^{1.179})^{1/2} \quad (54)$$

Como pormenor interessante neste caso, em comparação com o cargueiro e o rebocador, é que devido às suas reduzidas dimensões, esta embarcação tem a possibilidade de entrar dentro da marina. Consideraram-se então três casos de estudo com a lancha a entrar e imobilizar-se dentro da marina, seguindo uma trajetória retilínea (cf. Figura 80). Foram analisados três casos distintos com alteração apenas da velocidade máxima atingida pela embarcação: Caso 1, $u = 5$ kn, i.e. $u = 2.57$ m/s; Caso 2, $u = 10$ kn, i.e. $u = 5.14$ m/s; Caso 3, $u = 15$ m/s, i.e. $u = 7.72$ m/s. As malhas com o campo de pressões têm as mesmas dimensões nos três casos, $20 \text{ m} \times 600 \text{ m}$, ancoradas no ponto $(x_0, y_0) \equiv (95, 50) \text{ m}$.

O domínio computacional tem as dimensões de $350 \text{ m} \times 700 \text{ m}$, incluindo zonas de esponja com a espessura de 50 m nas fronteiras W, S e E (ver Figura 80, onde não estão representadas as zonas de esponja). A discretização da malha de cálculo é $\Delta x = \Delta y = 1.0 \text{ m}$. O tempo de simulação foi de 270 s , com um passo de tempo $\Delta t = 0.025 \text{ s}$.

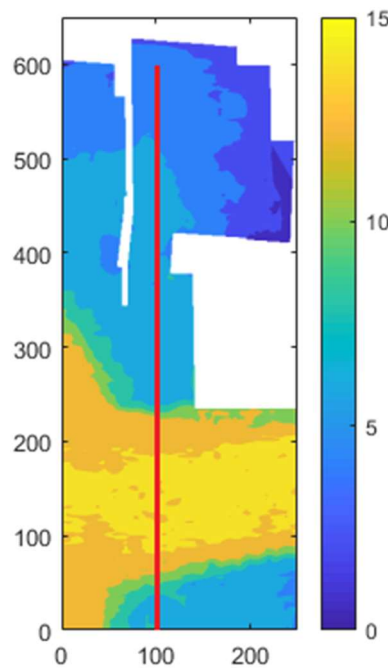


Figura 80: Domínio de cálculo e trajetória da lancha de pilotos.

Em todos os casos, o trajeto é composto por três segmentos retilíneos:

- no primeiro segmento, a lancha percorre uma trajetória com uma extensão de 50 m , com início no ponto de coordenadas $(100, 100) \text{ m}$. A velocidade da lancha cresce linearmente com a distância percorrida, desde uma velocidade quase nula até a uma velocidade máxima pretendida;
- no segundo segmento, a lancha percorre uma trajetória com uma extensão de 400 m , com uma velocidade constante igual à velocidade máxima pretendida;

- no terceiro segmento, a lancha percorre uma trajetória com uma extensão de 50 m. A velocidade da lancha diminui linearmente com a distância percorrida, desde uma velocidade igual à velocidade máxima pretendida, no início do segmento, até a uma velocidade quase nula no instante em que termina o seu movimento.

5.3.1. CASO 1 — VELOCIDADE 5 KN

Nas Figuras Figura 81 e Figura 82, é possível observar o padrão das ondas de esteira geradas pela lancha à velocidade de 5 kn. Neste caso, são praticamente impercetíveis as ondas divergentes, sendo apenas detetáveis as ondas transversais formando uma cauda atrás da embarcação. Verifica-se que, a pequena distância da trajetória, a amplitude das ondas é já negligenciável.

O registo da altura de onda máxima para a secção de entrada da marina (ver Figura 83) mostra alturas de onda inferiores a 10 cm em praticamente toda o comprimento desta secção. O registo na zona central (em torno de $x = 95$ m) corresponde à soma do próprio calado da embarcação com a amplitude da onda de popa (ou da onda proa) e deve ser ignorado.

Aplicando a velocidade $u = 2.57$ m/s na equação (54), método de Bhowmik, resulta uma altura de onda máxima estimada de 0.65 m a 16 m da trajetória. Este é um valor muito elevado e que contrasta com os valores obtidos na simulação. Esta discrepância deve ser consequência do facto de o método de Bhowmik só ser valido para embarcações a alta velocidade, o que não se verifica neste caso.

É evidente que o Caso 1, $u = 5$ kn, não representa uma situação de insegurança ou desconforto para os utilizadores da marina de recreio. Na Figura 84 é ainda apresentada uma visualização 3D do campo de ondas, onde é visível a existência de alguma agitação no exterior da marina e, com menor amplitude e apenas na vizinhança da trajetória, no seu interior.

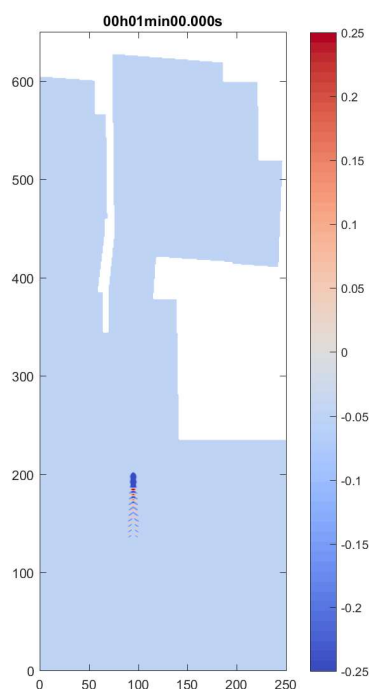


Figura 81: Agitação provocada pela lancha para $u = 5$ kn em $t = 60$ s.

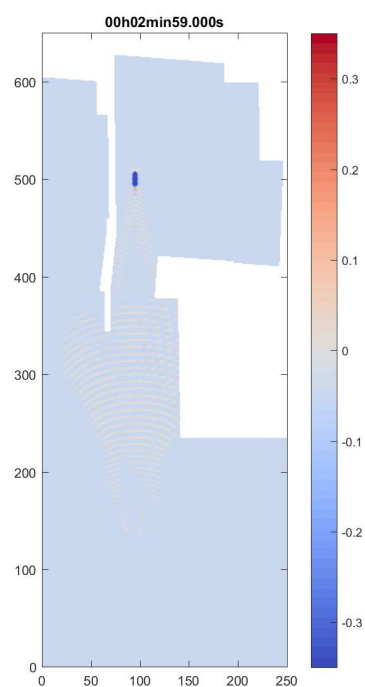


Figura 82: Agitação provocada pela lancha para $u = 5$ kn em $t = 179$ s.

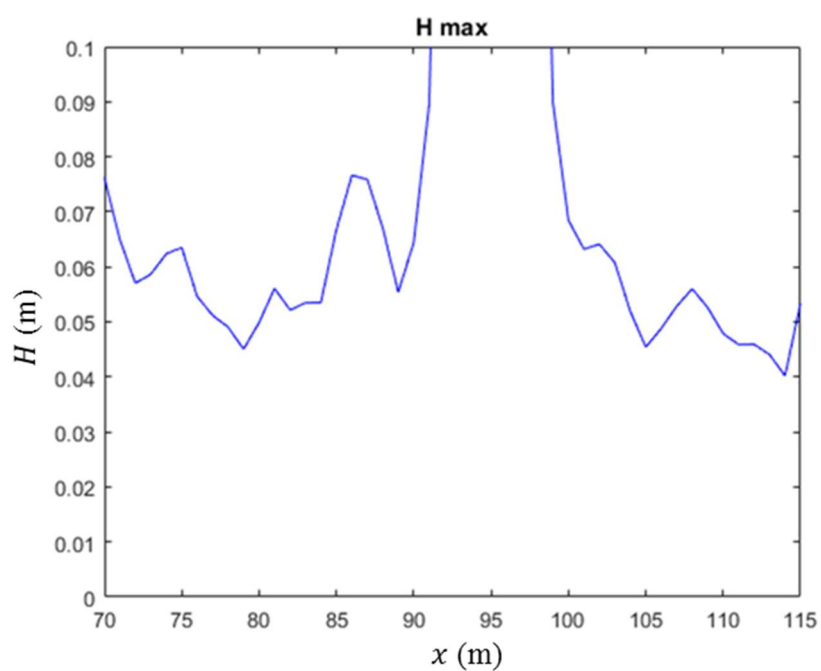


Figura 83: Altura de onda máxima provocada pela lancha na secção de entrada da marina para $u = 5$ kn.

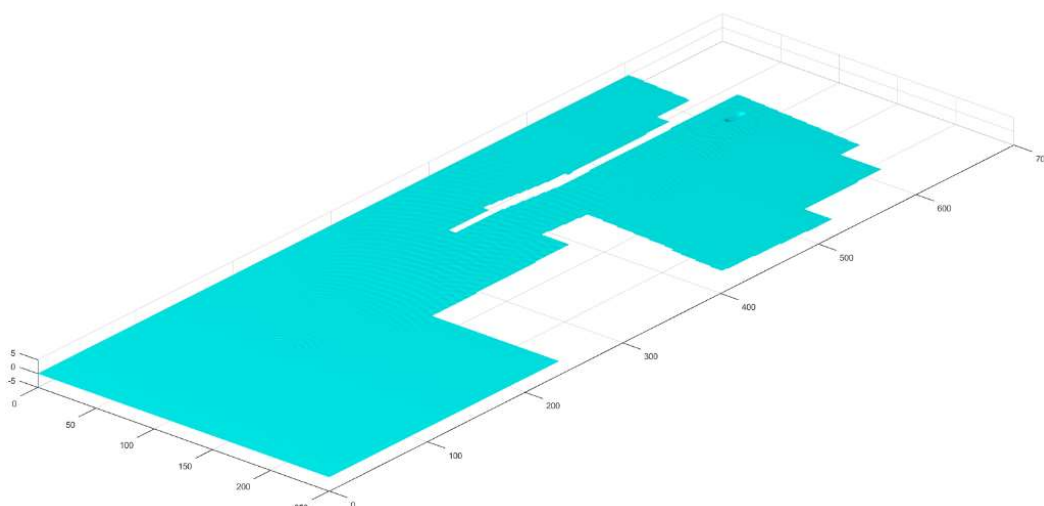


Figura 84: Visualização 3D para $t = 200$ s (escala vertical ampliada com um fator 2).

5.3.2. CASO 2 — VELOCIDADE 10 KN

Nas Figuras Figura 85 a Figura 87, está representado o padrão 2DH das ondas de esteira geradas pela lancha à velocidade de 10 kn. Neste caso, é já detetável a presença das ondas divergentes e das ondas transversais. A amplitude das ondas de esteira é também notoriamente mais elevada do que no Caso 1 ($u = 5$ kn).

As alturas de onda máxima registadas na secção de entrada da marina (ver Figura 88) mostra alturas de onda de cerca de 50 cm em toda a largura desta secção. O registo na zona central (em torno de $x = 95$ m) corresponde à soma do próprio calado da embarcação com a amplitude da onda de popa (ou da onda proa) e deve ser ignorado. Junto das extremidades, a amplitude das ondas é um pouco mais elevada, provavelmente devido a alguma reflexão nas paredes dos molhes,

Neste caso, já é bem visível a ondulação provocada pela passagem da lancha, onde a amplitude das ondas de esteira sobe cerca de uma ordem de grandeza para o dobro da velocidade. Como a embarcação penetra dentro da marina, também a geração das ondas de esteira se dará no interior da marina. Desta forma, o estudo do efeito da extensão do molhe oeste não é mensurável. A ondulação prevista pelo SWASH numa secção interior da marina (identificada na Figura 89), é visível no gráfico da Figura 90, para um instante de tempo um pouco posterior à passagem da lancha. É ainda interessante, analisar os fenómenos de reflexão no interior da marina, visíveis no gráfico da Figura 90, e que pode levar a interferência construtiva e agravar os efeitos indesejáveis da ondulação.

Finalmente, nas Figuras Figura 91 e Figura 92 são apresentadas visualizações 3D do campo de ondas nos instantes $t = 120$ s e $t = 200$ s. É evidente o elevado nível de agitação no interior da marina, com valores da altura de onda que tornam a marina desconfortável, e provavelmente perigosa, para os seus utilizadores.

Aplicando a velocidade $u = 5.14$ m/s na equação (54), método de Bhowmik, resulta uma altura de onda máxima estimada de 0.9 m a 16 m da trajetória. Este valor é da ordem de grandeza dos valores calculados pelo SWASH.

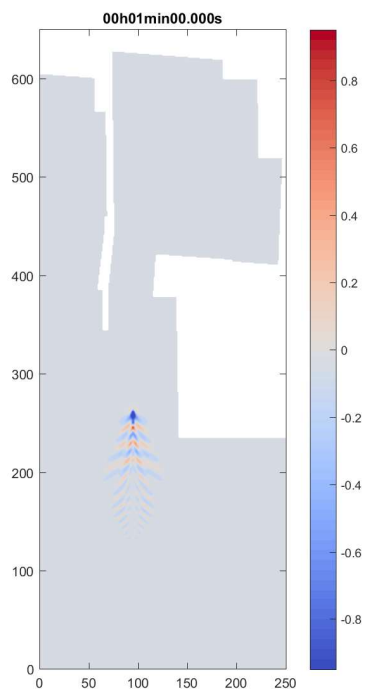


Figura 85: Agitação provocada pela lancha para $u = 10$ kn em $t = 60$ s.

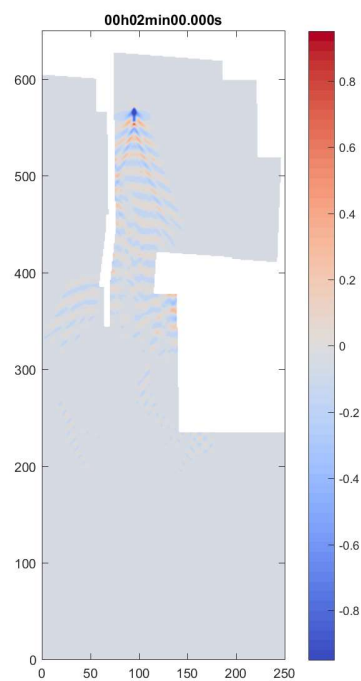


Figura 86: Agitação provocada pela lancha para $u = 10$ kn em $t = 120$ s.

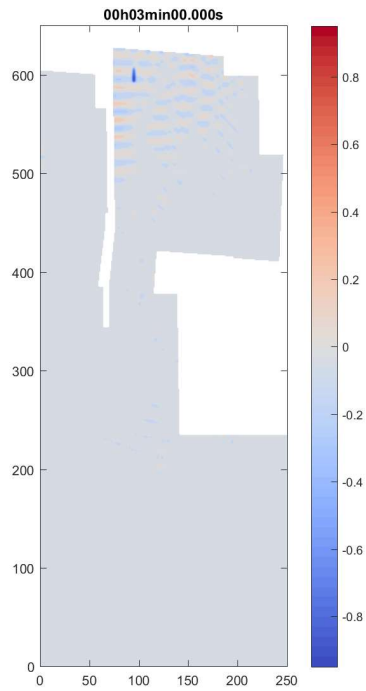


Figura 87: Agitação provocada pela lancha para $u = 10$ kn em $t = 180$ s.

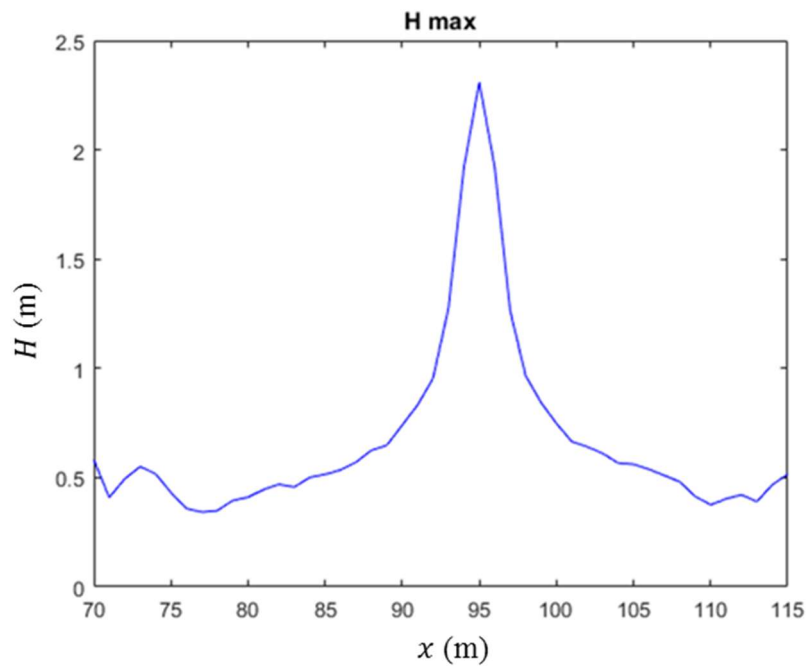


Figura 88: Altura de onda máxima pela lancha à entrada da marina para $u = 10$ kn.

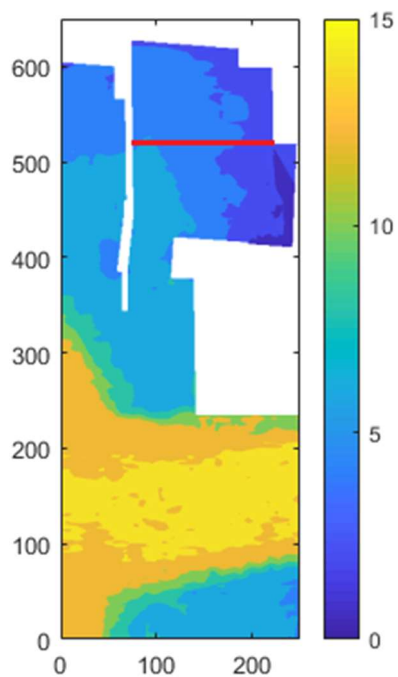


Figura 89: Transepto no interior da marina, para registo da agitação.

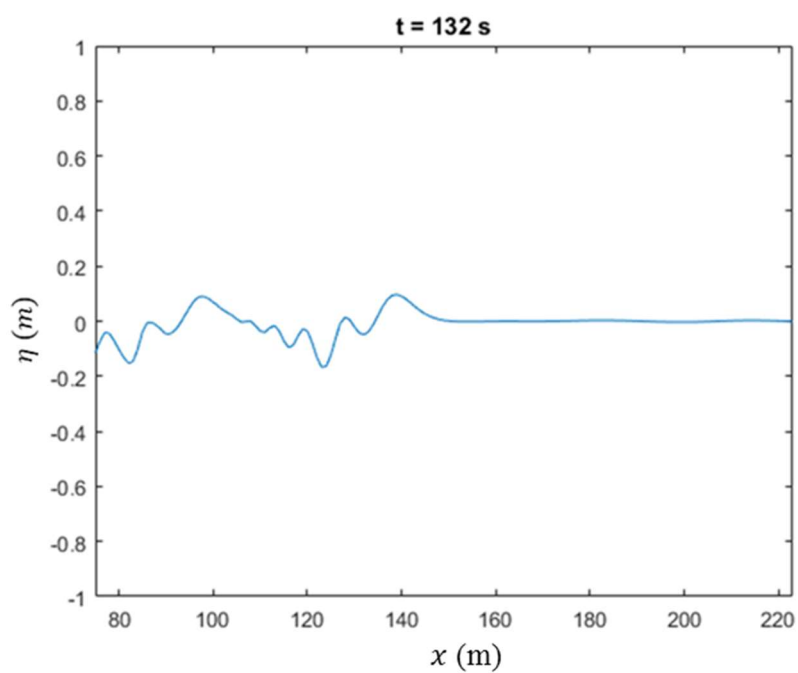


Figura 90: Elevação da superfície livre, provocada pela passagem da lancha, em $t = 132$ s.

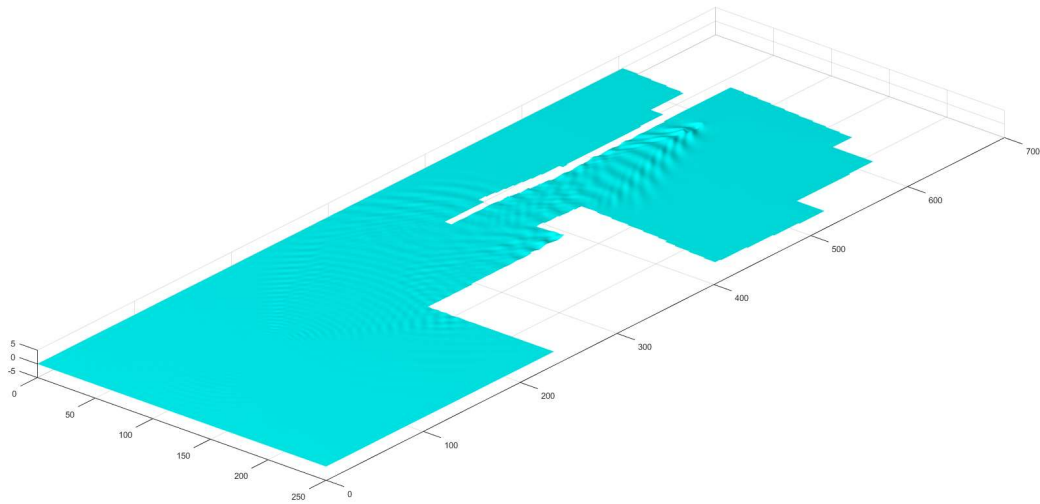


Figura 91: Visualização 3D para $t = 120$ s (escala vertical ampliada por um fator 2).

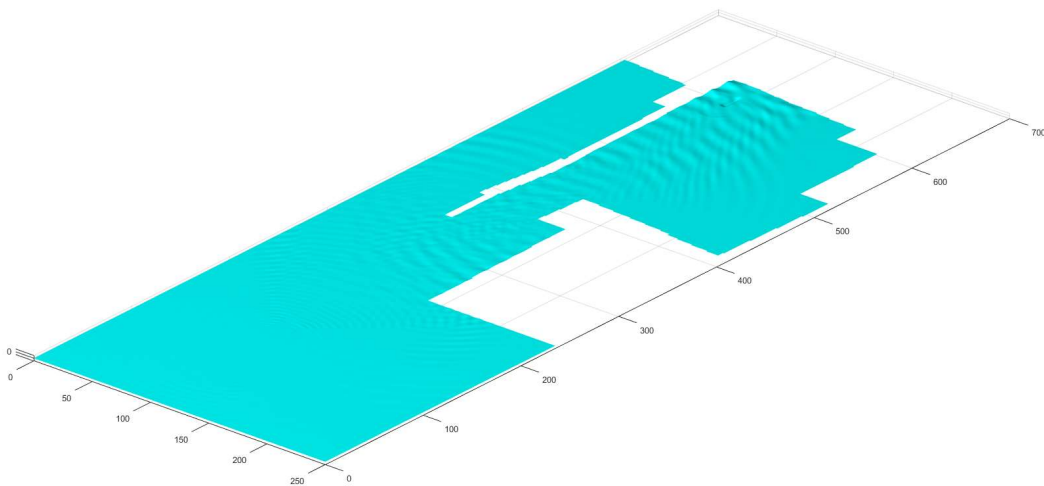


Figura 92: Visualização 3D para $t = 150$ s (escala vertical ampliada por um fator 2).

5.3.3. CASO 3 — VELOCIDADE 15 KN

Nas Figuras Figura 93 a Figura 98, está representado o padrão 2DH das ondas de esteira geradas pela lancha à velocidade de 15 kn. Depois da lancha entrar na marina (Figuras Figura 95 a Figura 98), as ondas de esteira ficam confinadas ao espaço que delimita a mesma, sendo apenas possível a radiação de energia pela entrada da marina. Sendo as paredes da marina verticais, com um coeficiente de reflexão unitário, as ondas são totalmente refletidas por aquelas. Resulta daqui um padrão de reflexão que se espalha por toda a área da marina e que cerca de 1 min, como se pode verificar na imagem da Figura 98. Não havendo dissipação por rebentação, apenas o atrito no fundo e a radiação para o exterior pela entrada da marina permitirão reduzir o nível energético no interior da marina.

Aplicando a velocidade $u = 7.72$ m/s na equação (54), método de Bhowmik, a altura de onda estimada é de 5 m a uma distância de 16 m da trajetória. Este valor é obviamente irrealista. Conclui-se então o

modelo de Bhowmik falha para velocidades muito elevadas, conclui-se então que é necessário ter cuidado com a utilização deste método, já que parece funcionar apenas para gamas relativamente restritivas de velocidades e dimensões de embarcações.

Para uma compreensão mais intuitiva da elevada amplitude das ondas de esteira e dos seus efeitos no interior da marina para este Caso 3, compare-se a agitação representada na visualização 3D da Figura 101, com as visualizações 3D do Caso 2 (ver Figuras Figura 91 e Figura 92).

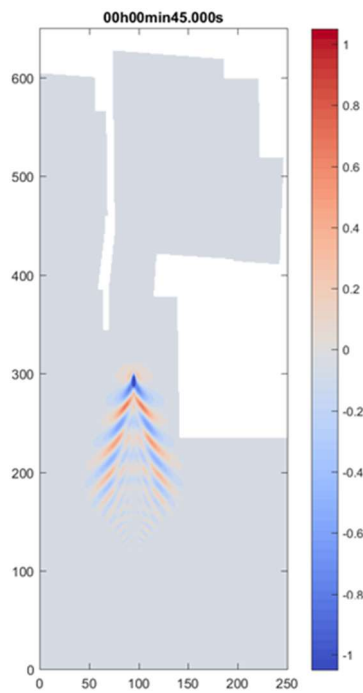


Figura 93: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 45$ s.

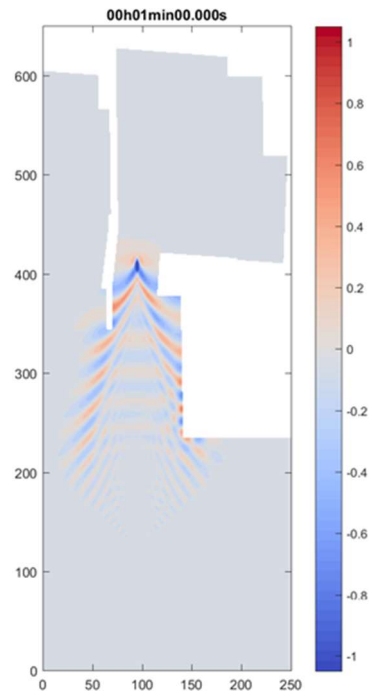


Figura 94: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 60$ s.

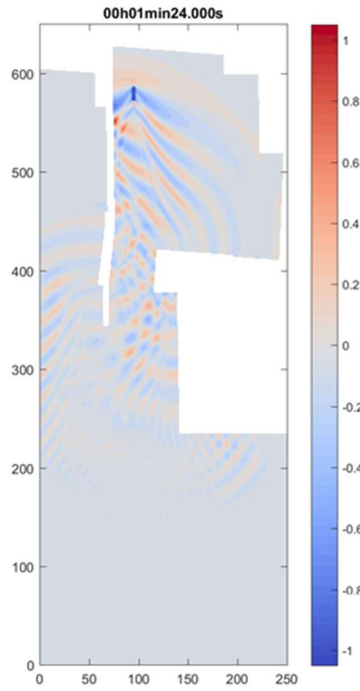


Figura 95: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 84$ s.

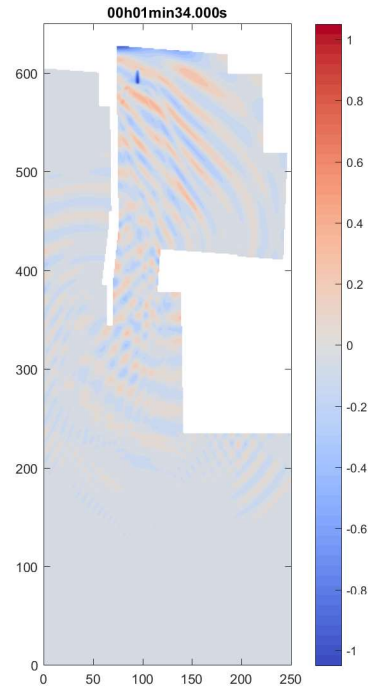


Figura 96: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 94$ s.

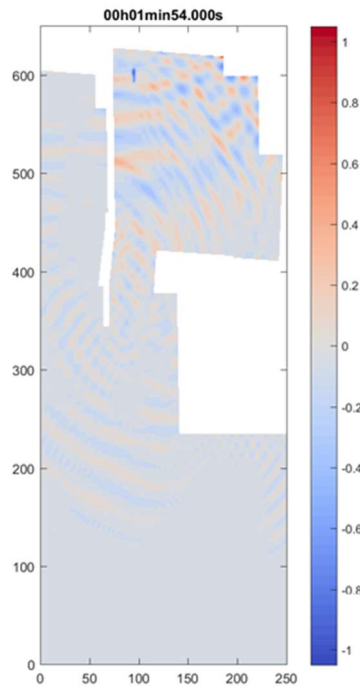


Figura 97: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 114$ s.

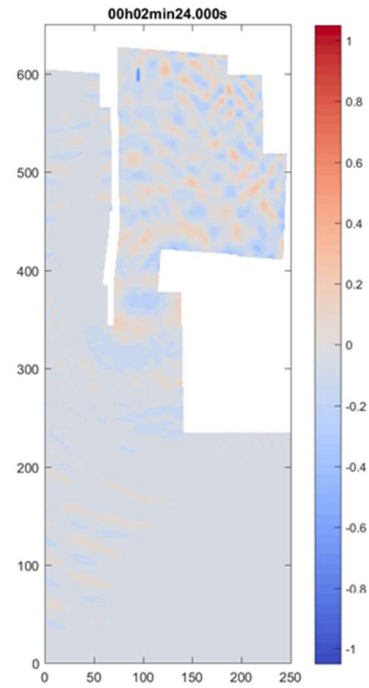


Figura 98: Ondas de esteira com $u = 15$ kn em $t = 144$ s.

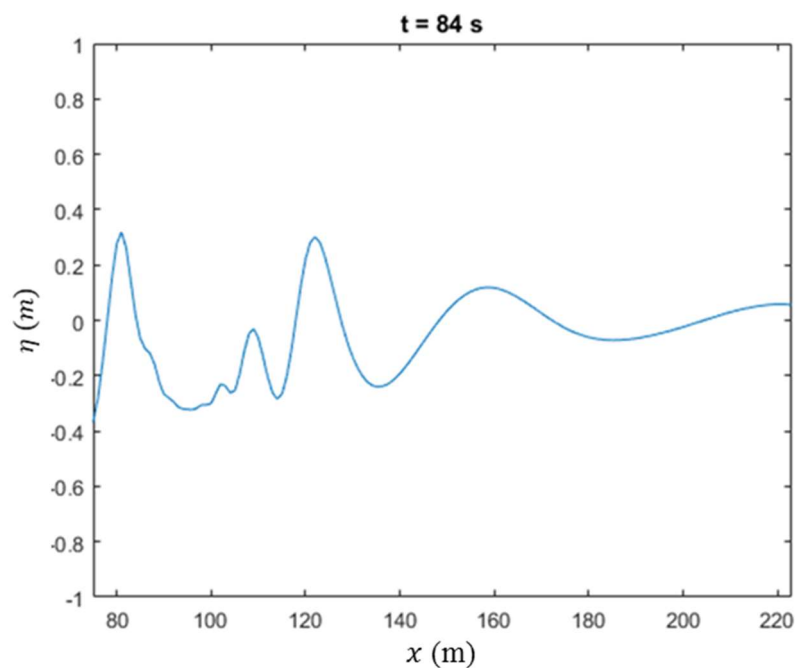


Figura 99: Agitação no interior da marina para $u = 15$ kn em $t = 84$ s.

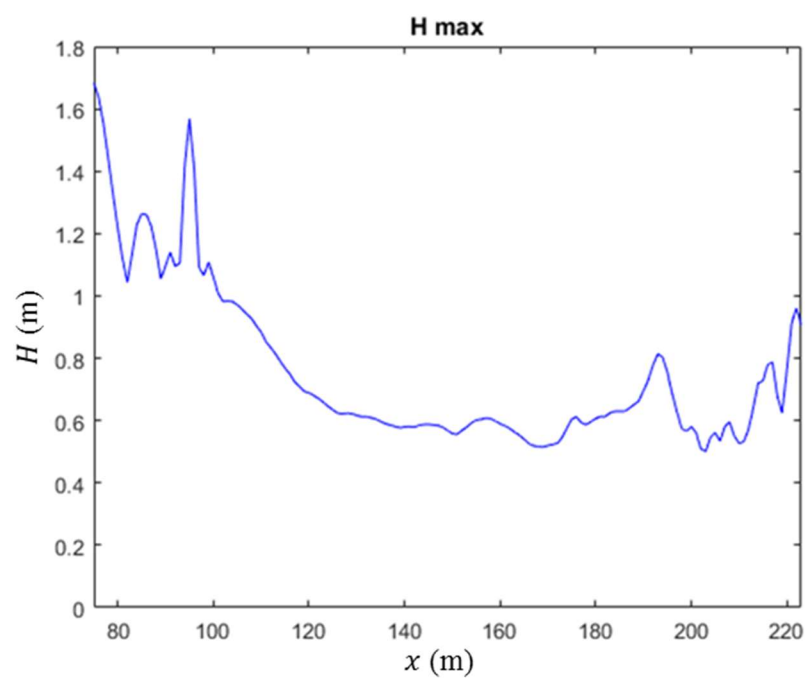


Figura 100: Altura de onda máxima no interior da marina para $u = 15$ kn.

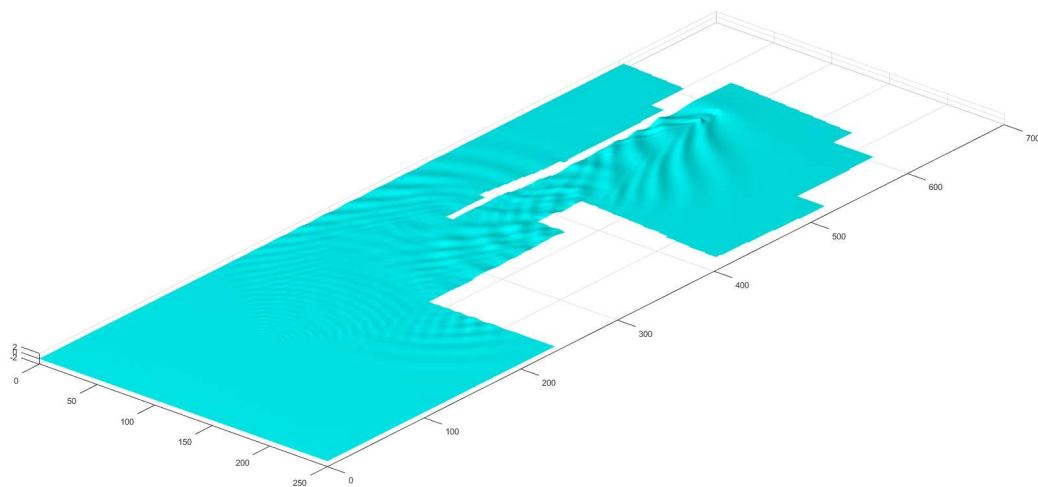


Figura 101: Visualização 3D para $t = 150$ s (escala vertical multiplicada por um fator 2).

6

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Mais do que estudar o processo de formação das ondas geradas por embarcações (ondas de esteira), esta dissertação avaliou a propagação dessas ondas num ambiente portuário, onde três tipos de embarcação próprias desse meio foram simuladas, através de um campo de pressões móvel, com trajetos e velocidades semelhantes aos que ocorrem no interior do domínio portuário.

O foco principal do estudo foi a marina de recreio do porto de Leixões, que se mostrou suficientemente protegida da agitação que é formada no canal de navegação do porto. Os molhes que definem a entrada da marina dão origem a um mecanismo de confinamento da ondulação, graças aos fenómenos de reflexão constantes, que impede a propagação das esteiras para o interior da marina de recreio.

Verificou-se ainda que embarcações de grande porte (cargueiros), que devido às suas grandes dimensões, se deslocam a baixa velocidade no interior do porto, não são preocupantes para o conforto ou para a segurança das embarcações e tripulações que utilizem a marina e recreio. De facto, essas embarcações geram ondas de amplitude praticamente desprezável, dando força à ideia de que o parâmetro mais importante na consideração da energia (que se manifesta na amplitude) destas ondas de esteira é a velocidade da embarcação que as origina. Essa ideia ficou ainda mais marcada, quando se comparou a amplitude das ondas geradas por um rebocador de 500 t a uma velocidade de 12.4 kn, com a amplitude das ondas geradas pela lancha de pilotos, com um deslocamento de 40 t, a uma velocidade de 15 kn. De facto, estas duas embarcações produzem ondas de amplitude semelhante, apesar da massa 8 vezes maior do rebocador.

Conclui-se também que, quando a ondulação é gerada no interior da marina, como no caso onde a lancha se desloca para o seu interior, é muito difícil que a ondulação diminua num curto espaço de tempo, podendo manter a mesma ordem de grandeza por mais de 1 min. Este efeito é devido à geometria em planta e na vertical das paredes da marina, propensas propensa a constantes reflexões.

Numa componente mais técnica, o SWASH revelou-se uma ferramenta robusta, no sentido de que permite moldar com bastante liberdade o problema que se pretende abordar, e também bastante preciso, obtendo resultados muito bons nas duas validações realizadas, comparativamente a trabalhos semelhantes onde foram utilizados modelos baseados nas equações de Boussinesq.

6.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

As equações empíricas utilizadas para estimação da altura de onda máxima, e que estão resumidas na Tabela 2, resultam em valores algo diferentes daqueles obtidos pelo SWASH. Era de esperar esse erro, dado tratarem-se de expressões condicionadas pelas limitações dos ensaios físicos em laboratório. No entanto, em alguns casos esse erro é muito grande, pelo que procurar uma nova expressão que fosse mais robusta e aplicável num espectro de situações mais abrangente seria de grande interesse prático.

Verificou-se ainda durante a realização deste trabalho, a assimetria que existe na amplitude e na forma de propagação das ondas de esteira quando estas são formadas por uma embarcação em trajetória curvilínea. Será, portanto, conveniente um estudo mais profundo, que permita melhor compreender este processo e dessa forma, encontrar medidas de mitigação dos efeitos prejudiciais que estas ondas podem ter, como erosão em rios ou instabilidades em marinas.

Um outro aspeto que merece ser considerado e aprofundado trata-se do efeito de aquaplanagem. No caso de embarcações de menores dimensões, considerar as alterações que existem no volume de água deslocado em função da velocidade de propagação, já que se verifica uma redução desse volume para velocidades mais elevadas.

Por fim, e como continuação deste trabalho, poderão ser estudadas outras trajetórias, outras velocidades e outros tipos de embarcação, não limitando o estudo à marina de recreio, mas alargando-o a outras zonas do porto, ou até fora dele, aproveitando o facto de o modelo SWASH ter um campo de aplicação muitíssimo vasto e que inclui a geração de ondas forçadas pelo vento.

7

ANEXOS

7.1. FORMULAÇÕES DOS CASCOS

As expressões definidoras dos cascos resultam de uma comunicação privada de P. Avilez-Valente (2017). O significado das variáveis presentes nas equações, deverá ser procurado nas Figuras Figura 102 a Figura 105.

SECÇÃO HORIZONTAL AO NÍVEL DA LINHA DE ÁGUA

Proa:

$$\left(\frac{x}{L_B}\right)^{c_B} + \left(\frac{y}{B}\right)^{c_B} = 1 \quad (55)$$

$$\ell_y = L_B \cdot \left(1 - \left(\frac{y}{B}\right)^{c_B}\right)^{1/c_B} \quad (56)$$

$$b_y = B \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{L_B}\right)^{c_B}\right)^{1/c_B} \quad (57)$$

Popa:

$$\left(\frac{x}{L_S}\right)^{c_S} + \left(\frac{y}{B}\right)^{c_S} = 1 \quad (58)$$

$$\ell_y = L_S \cdot \left(1 - \left(\frac{y}{B}\right)^{c_S}\right)^{1/c_S} \quad (59)$$

$$b_y = B \cdot \left(1 - \left(\frac{x}{L_S}\right)^{c_S}\right)^{1/c_S} \quad (60)$$

SECÇÃO VERTICAL A MEIA-BOCA

Proa:

$$\left(\frac{x}{L_B}\right)^{C_{BV}} + \left(\frac{z}{D}\right)^2 = 1 \quad (61)$$

$$d_x = D \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{L_B}\right)^{C_{BV}}} \quad (62)$$

Popa (cargueiro e lancha de pilotos):

$$\left(\frac{x}{L_S}\right)^{C_{SV}} + \left(\frac{z}{D}\right)^2 = 1 \quad (63)$$

$$d_x = D \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{L_S}\right)^{C_{SV}}} \quad (64)$$

Popa (rebocador):

$$d_x = D \cdot \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \sin \left(\left(\frac{2 \cdot x}{K_S \cdot L_S} + 1 \right) \cdot \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (65)$$

SECÇÃO VERTICAIS TRANSVERSAIS

Proa:

$$z_{\text{hull}} = d_x \cdot \left(1 - \frac{y}{b_x} \right)^{C_P \frac{3}{2} \left(\frac{x}{L_y} \right)^2 - 1} \quad (66)$$

Proa:

$$z_{\text{hull}} = d_x \cdot \left(1 - \frac{y}{b_x} \right)^{1/C_P} \quad (67)$$

Tabela 3: Coeficientes definidores dos cascos, adotados nesta dissertação.

	L_B	L_S	B	D	C_B	C_S	C_{BV}	C_{SV}	K_S	C_P
	(m)	(m)	(m)	(m)	(—)	(—)	(—)	(—)	(—)	(—)
Cargueiro	50	50	10	5.35	2	4	8	2		4
Lancha de pilotos	8	8	4	3.79	2	4	4	20		1
Rebocador	14	14	5	0.99	3	5	2	2	1	5

FIGURAS

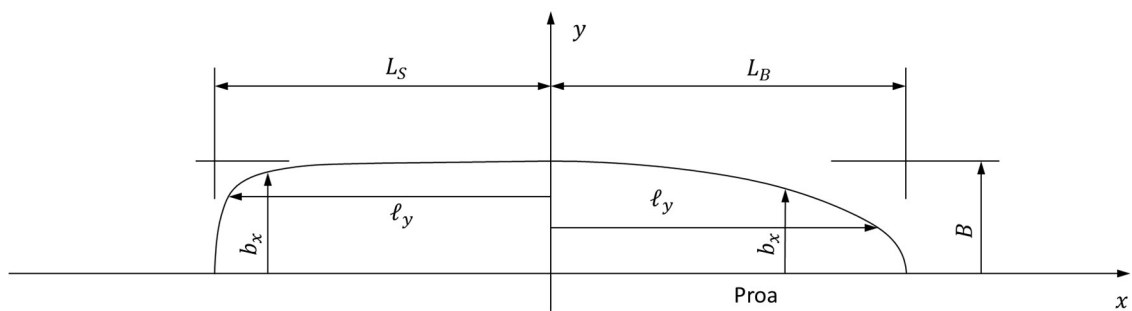


Figura 102: Corte horizontal pela linha de água. Vista de cima.

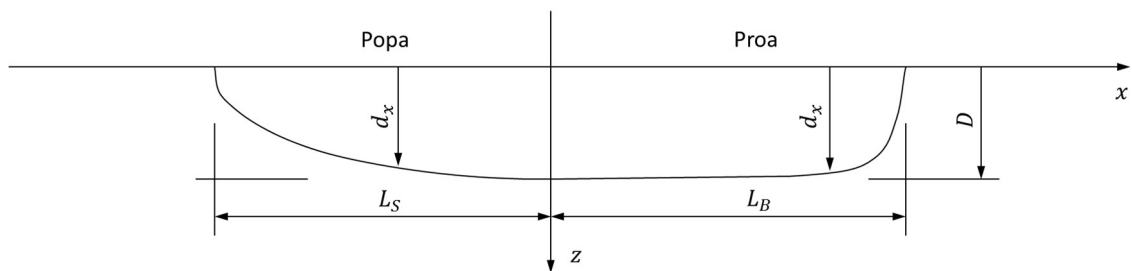


Figura 103: Corte vertical a meia-água (cargueiro e lancha de pilotos). Vista de estibordo.

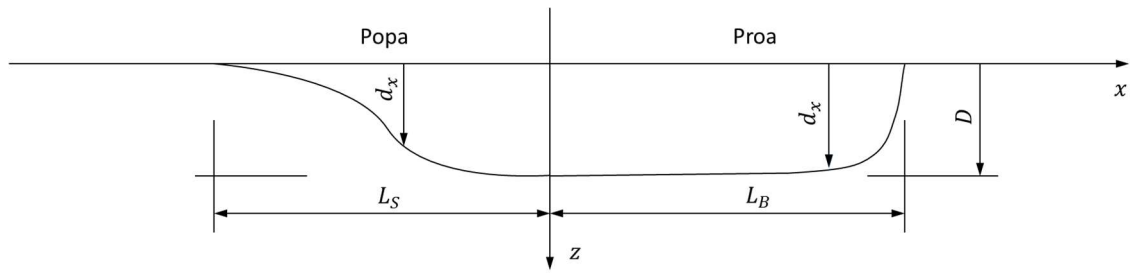


Figura 104: Corte vertical a meia-água (rebocador). Vista de estibordo.

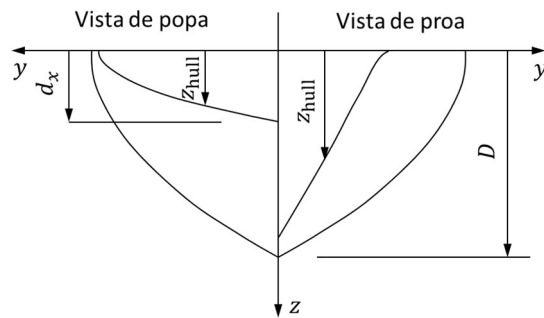


Figura 105: Corte verticais transversais. Vista de proa e vista de popa.

7.2. VISTAS DO CARGUEIRO UTILIZADO NA MODELAÇÃO

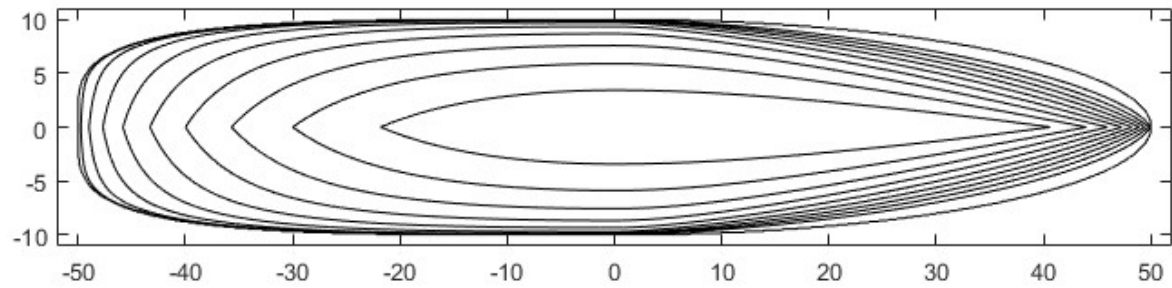


Figura 106: Vista do casco da embarcação.

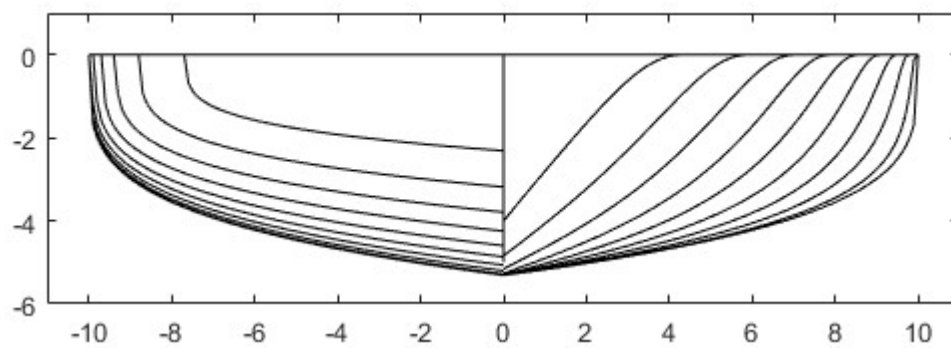


Figura 107: Vista da popa e da proa da embarcação.

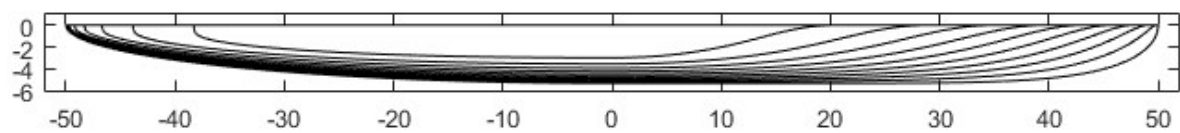


Figura 108: Vista da lateral da embarcação.

7.3. VISTAS DO REBOCADOR UTILIZADO NA MODELAÇÃO

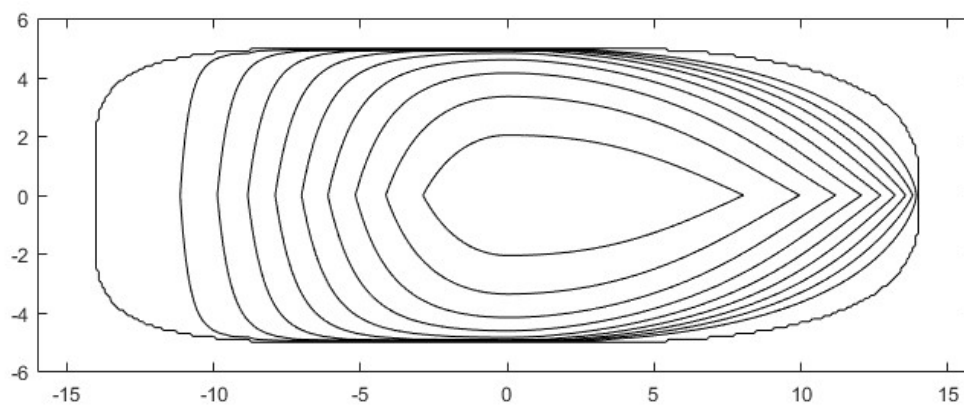


Figura 109: Vista do casco da embarcação.

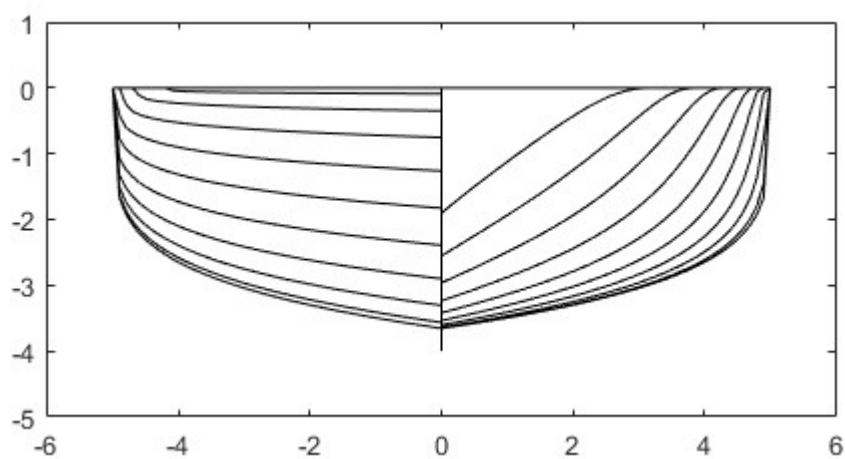


Figura 110: Vista da popa e da proa da embarcação.

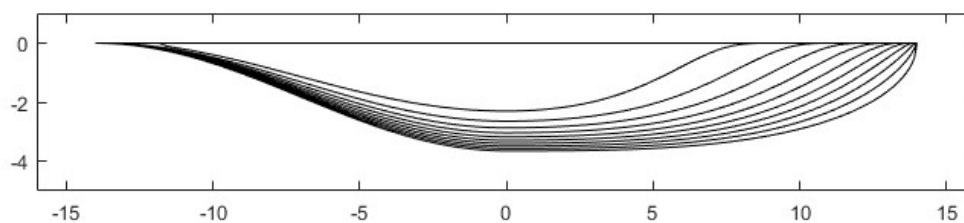


Figura 111: Vista da lateral da embarcação.

7.4. VISTAS DA LANCHA DE PILOTOS UTILIZADA NA MODELAÇÃO

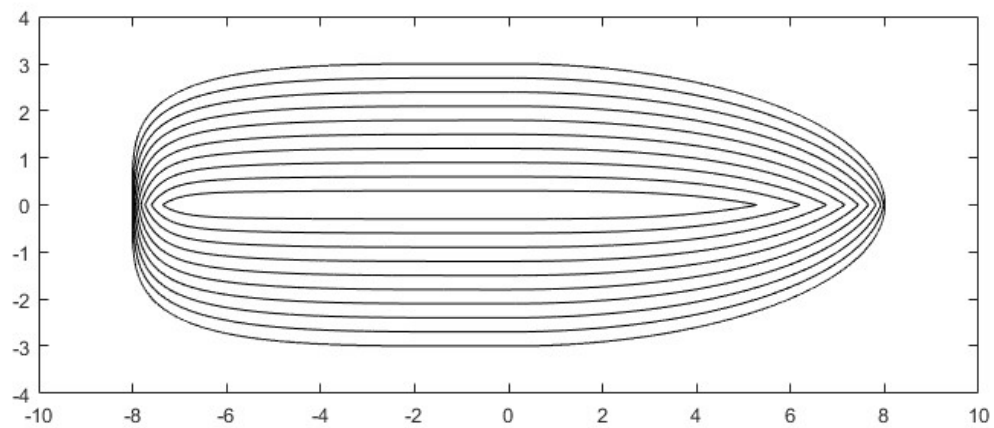


Figura 112: Vista do casco da embarcação.

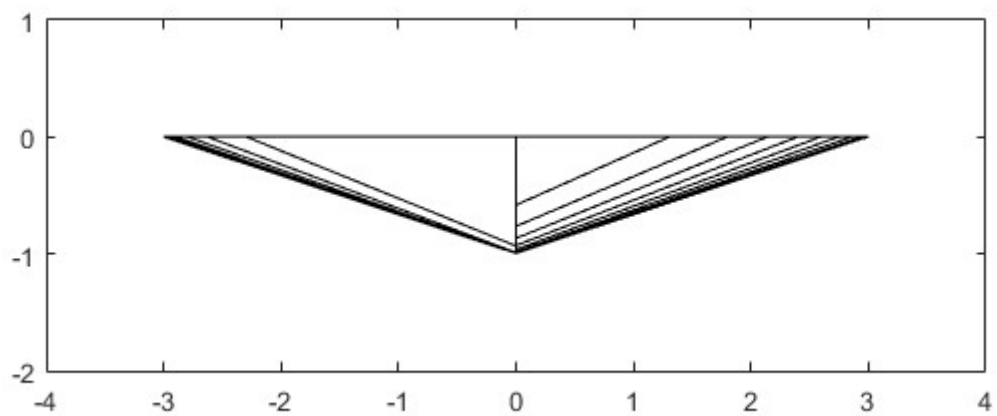


Figura 113: Vista da popa e da proa da embarcação.

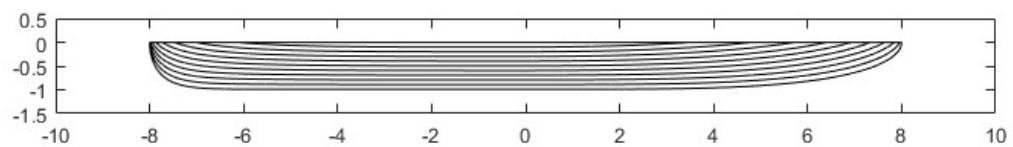


Figura 114: Vista da lateral da embarcação.

BIBLIOGRAFIA

- Aage C, Bell A, Bergdahl L, Blume A, Bolt E, Eusterbarkey H, Hiraishi T, Kofoed-Hansen H, Maly D, Single M, Ryttonen J, Whittaker T (2003). *Guidelines for Managing Wake Wash from High-Speed Vessels*. International Navigation Association
- Althage J (2010). *Ship-Induced Waves and Sediment Transport in Göta River, Sweden*. Master's Thesis, Lunds Universitet.
- Antunes do Carmo JS (2011). Equações de Boussinesq com características dispersivas melhoradas — Aplicações. *Recursos Hídricos* 32:7-16.
- Araújo ARE (2016). *Modelação Não Linear e Não Hidrostática de Ondas de Superfície em Fundos de Variação Rápida — Modelo SWASH*. Tese de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.
- Bayraktar Ersan D, Beji S (2013). Numerical simulation of waves generated by a moving pressure field. *Ocean Engineering* 59:231–239.
- Bhowmik NG, Demissie M, Guo C-Y (1982). *Waves Generated by River Traffic and Wind on the Illinois and Mississippi Rivers*. WRC Research Report No. 167, University of Illinois Water Resources Center, Urbana, Illinois.
- Bhowmik NG, Soong TW, Reichelt WF, Seddik NML (1975). *Waves Generated by Recreational Traffic on the Upper Mississippi River System*. Illinois State Water Survey 117.
- Booij N, Holthuijsen LH, Ris RC (1996). The SWAN wave model for shallow water. *Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering*, Orlando, USA, ASCE, 668–676.
- Boussinesq J (1872). Théorie des ondes et des remous qui se propagent le long d'un canal rectangulaire horizontal, en communiquant au liquide contenu dans ce canal des vitesses sensiblement pareilles de la surface au fond. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées, Série II* 17:55–108.
- David CG, Roeber V, Goseberg N, Schlurmann T (2017). Generation and propagation of ship-borne waves—Solutions from a Boussinesq-type model. *Coastal Engineering* 127:170–187.
- De Roo S, Van Crombrugge W, Troch P, Van Acker J, Maes E (2010). Field monitoring of ship-induced loads on (alternative) bank protections of non-tidal waterways. *Proceedings of the PIANC MMX Conference*, 10–14 May 2010, Liverpool, UK, 10 pp.

- Ersan DB, Beji S (2012). Water waves generated by moving pressure fields. *International Offshore and Polar Engineering Conference* 17-22 June 2012, Rhodes, Greece, 638–642.
- Ersan DB, Beji S (2013). Water waves generated by a moving pressure field. *Ocean Engineering* 59:638–642.
- Forte I (2017). Estudo da aplicabilidade do modelo numérico SWASH para o cálculo de galgamentos no Sistema HIDRALERTA. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.
- Froude W (1877). Experiments upon the effect produced on the wave-making resistance of ships by length of parallel middle body. *Transactions of the Institute of Naval Architects* 18:77–87.
- Havelock TH (1908). The propagation of groups of waves in dispersive media, with application to waves on water produced by a travelling disturbance. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol. LXXXI*:398–430.
- Kelvin WT (1887). On ship waves. *Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers* 8:409–433.
- Kriebel D, Seelig W (2005). An empirical model for ship-generated waves. *Proceedings of the Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES 2005)*, Edge BL, Santa JC (Eds), July 3–7, 2005, Madrid, Spain.
- Scullen DC, Tuck EO (2011). Free-surface elevation due to moving pressure distributions in three dimensions. *Journal of Engineering Mathematics* 70:29–42.
- Smit P, Janssen T, Holthuijsen L, Smith J (2014). Non-hydrostatic modeling of surf zone wave dynamics. *Coastal Engineering* 83:36–48.
- Smit P, Zijlema M, Stelling G (2013). Depth-induced wave breaking in a non-hydrostatic, near-shore wave model. *Coastal Engineering* 76:1–16.
- Soomere T (2007). Nonlinear components of ship wake waves. *Applied Mechanics Reviews* 60:120–138.
- Sorensen RM, Weggel JR (1984). Development of ship wave design information. *Proceedings of the 19th International Conference on Coastal Engineering*, Edge BL (Ed), September 3–7, 1984, Houston, Texas, ASCE, 327–3243.
- Stratigaki V, Vanneste D, Troch PA, Gysens S, Willems M (2011). Numerical modelling of wave penetration in Ostend harbour. *32nd International Conference on Coastal Engineering* June 30–July 5, 2010, Shanghai, ASCE, 15 pp.
- The SWASH Team (2017). *SWASH User Manual*, SWASH version 4.01A, Delft University of Technology.
- Thorpe TW, Shiach J Ben, Dr M C Deo, Eriksson E, Kamath A, Maguire AE, Sorensen RM, Nema PK, No R (2013). Wave theories. *Umea* 3:18–46, Alexiadou N, Rönnberg L (Eds).
- Torsvik T, Soomere T (2008). Simulation of patterns of wakes from high-speed ferries in Tallinn Bay. *Estonian Journal of Engineering* 14:232–254.

USACE (1980). *Locks and Dam Replacement, Ohio River, Phase I, Advanced Engineering and Design Study. General Design Memorandum. Appendix J, Vol. 1, Environmental and Social Impact Analysis*. US Army Corps of Engineers, Huntington District. Gallipolis.

Zijlema M, Stelling G, Smit P (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering* 58:992–1012.

Zijlema M, Stelling GS (2008). Efficient computation of surf zone waves using the nonlinear shallow water equations with non-hydrostatic pressure. *Coastal Engineering* 55:780–790.